

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

SIMULACE PŘIROZENÉHO A NUCENÉHO CHLAZENÍ
TRANSFORMÁTORU

(SIMULATION OF NATURAL AND AIR-FORCED COOLING
OF TRANSFORMER)

Zadání diplomové práce

1. Úvod
2. Popište základní konstrukci a činnost transformátoru
3. Vytvořte numerický model transformátoru pro řešení oteplení
4. Proveďte simulační výpočet přirozeného a nuceného chlazení
5. Vyhodnoťte výsledky simulace
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
2. CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
3. BLEJCHAŘ, Tomáš, Návody do cvičení "Modelování proudění" - CFX, Ostrava, 2008, VŠB-TU Ostrava
4. Katalogy a katalogové listy
5. Odborné a technické www stránky
6. Technické normy

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Kačor, Ph.D.

Datum zadání:

20. listopadu 2009

Datum odevzdání:

7. května 2010

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne

.....

Podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za cenné rady a zejména za neocenitelnou pomoc při vytváření a přípravě numerických modelů pro simulace ve výpočetních programech.

Abstrakt

V dnešní době jsou numerické metody hlavním výpočetním nástrojem. Metoda konečných prvků se stala hlavním výpočetním prostředkem ve všech technických odvětvích – strojírenství, elektrotechnickém průmyslu a dalších. Využívá se při vývoji, návrhu a konstrukci nových výrobků, popřípadě pro úpravu rozměrů či použitých materiálů stávajících zařízení. Nespornou výhodou metody konečných prvků jsou grafické výstupy, které v krátkém čase podávají odpovědi, jak by se simulované prvky chovaly v reálu. Metodou konečných prvků se dosahuje zjednodušení, zrychlení a zlevnění návrhu a výroby nových prvků (zařízení).

V diplomové práci bude popsána konstrukce, funkce transformátoru, jeho zahřívání a chlazení. Stěžejním bodem diplomové práce je ukázat tvorbu modelu transformátoru pomocí CAD programu a následně metodou konečných prvků simulovat zahřívání a chlazení transformátoru skutečných rozměrů ve výpočetním softwaru.

Abstrakt

Numerical analysis are key computing tools nowadays. Finite Element Method became primary objective computation aids in all technical spheres – mechanical engineering, electrical industry etc. It's used to development, design and construction new products, in some case for customization of measurement or used materials of existing devices.

Indisputable advantage of Finite Element Method are graphic outputs. In short time these outputs serve answer, how simulated elements would work in real. The Finite Element Method gives simplification, acceleration and reduction the price of concept and new element's (devices) production.

In diploma work will be describe construction, function, warming and cooling of transformer. The key point of this diploma work is show how make a model of transformer in CAD software and then simulate warming and cooling of transformer by Finite Element Method in computational software.

Klíčová slova

Numerické metody, metoda konečných prvků (MKP), transformátor, zahřívání, přirozené a nucené chlazení, CAD software, výpočetní software.

Key words

Numerical analysis, The Finite Element Method (FEM), transformer, warming, natural and air-forced cooling, CAD software, computational software.

Seznam použitých symbolů a zkratk

ΔP	ztráty	(W)
A	povrch úseku	(m ²)
A_k	účinný povrch pro proudění	(m ²)
A_s	chladicí povrch pro sálání	(m ²)
c	objemová tepelná kapacita	(J/m ³ .K)
C_1	konstanta	(-)
c_{01}	měrné teplo transformátorového oleje	(J/kg.K)
C_e	tekutinová konstanta	(-)
D	průměr	(m)
dQ	tepelné ztráty	(W)
e	elektromotorická síla	(V)
f	kmitočet	(Hz)
F	vztlak	(kp/m ³)
g	zrychlení tíže	(m/s ²)
Gr	Grashoffovo číslo	(-)
h	výška	(m)
I	elektrický proud	(A)
k_1, k_2	součinitel volený dle průměru vodiče	(-)
l	délka	(m)
N	počet závitů vinutí	(-)
Nu	Nusseltovo číslo	(-)
P	výkon, tepelné ztráty	(W)
P_1, P_2	odvedený tepelný výkon	(W)
Pr	Prandtlovo číslo	(-)
R	elektrický odpor	(Ω)
r	poloměr	(m)
R_θ	tepelný odpor	(K/W)
S	průřez	(m ²)
S_c	povrch cívky	(m ²)
t	čas	(s)
U	elektrické napětí	(V)
V	objem	(m ³)
v	rychlost	(m/S)
$\Delta\theta$	okamžité oteplení tělesa	(K)
α	součinitel přestupu tepla	(W/m ² .K)
β	objemový součinitel roztažnosti	(1/K)
γ	gravitační konstanta	(-)
δ	šířka kanálu mezi stěnami	(m)
ε_k	činitel zlepšení	(-)
η	dynamické viskozita	(N.s.m ⁻²)
Θ	teplota	(K)

ϑ	teplota	(°C)
ϑ_{ol}	požadovaný teplotní spád oleje	(°C)
ϑ_{pl}	dovolený teplotní spád	(°C)
λ	vodivost	(W/m.K)
λ_{ef}	efektivní součinitel vodivosti	(W/m.K)
λ_{ek}	ekvivalentní tepelná vodivost	(W/m.K)
μ	dynamická viskozita	(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
ν_{ol}	hustota oleje	(kg/m ³)
ρ	měrná hmotnost	(kp.s/m ²)
τ	časová konstanta	(s)
ν_{ol}	průtok olejového čerpadla	(m ³ /s)
Φ	magnetický tok	(Wb)
φ	okamžitá hodnota magnetického toku	(Wb)

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Podstata a funkce jednofázového transformátoru	4
2.1 Definice	4
2.2 Použití	4
2.3 Typy	4
2.4 Princip činnosti	5
2.5 Magnetický obvod transformátoru	6
2.6 Základní tvary magnetických obvodů jednofázových transformátorů	6
2.7 Základní tvary magnetických obvodů trojfázových transformátorů	9
2.8 Elektrický obvod	10
2.9 Chod naprázdno	11
2.10 Chod nakrátko	11
2.11 Chod při zatížení	12
2.2.3 Inovace u SolidWorks 2008	12
2.12 Ztráty transformátoru	12
3. Oteplování a chlazení transformátoru	13
3.1 Druhy transformátorů podle chladicího média.....	13
3.2 Tepelné účinky elektrického proudu – oteplování proudovodiče	13
3.3 Způsoby přenosu tepla	14
3.4 Použití Newtonovy formule pro výpočet přestupu tepla z povrchu teplého tělesa do okolního prostředí	16
3.5 Sálání a přirozená konvekce.....	19
3.6 Přirozená konvekce, ustálený stav	20
3.7 Oteplení olejového transformátoru	24
3.8 Stárnutí izolace.....	25
3.9 Principy chlazení.....	26
3.10 Souhrnná chladihost povrchu	27
3.11 Proudění v omezeném prostoru.....	27
3.12 Způsoby chlazení transformátoru	28
3.13 Chlazení s umělým ofukováním.....	28
3.14 Chlazení s nuceným oběhem oleje a odděleným chladičem	29
3.15 Porovnání systémů chlazení	31
4. Numerické modelování	32
4.1 Metoda konečných prvků.....	32
4.2 Ansys Workbench, CFD	32
4.3 Ansys CFX	33
4.4 Vytváření modelu.....	33
5. SolidWorks.....	34
6. Praktická část simulace přirozeného a nuceného chlazení transformátoru	35
6.1 Vytvoření numerického modelu transformátoru pro řešení oteplení	35
6.2 Import modelu transformátoru do výpočtového softwaru.....	38

6.3	Tvorba řezů prvků transformátoru a tvorba výpočetní sítě	39
6.4	Načtení výpočetní sítě, definice výpočetní oblasti	44
6.5	Definice fyzikálních, materiálních vlastností a okrajových podmínek pro simulaci přirozeného chlazení transformátoru.....	44
6.6	Definice fyzikálních, materiálních vlastností a okrajových podmínek pro simulaci nuceného chlazení transformátoru	47
6.7	Inicializace a nastavení řešiče, spuštění výpočtu	48
7.	Vyhodnocení výsledků.....	49
7.1	Počty elementů, doba výpočtu	49
7.2	Grafické výstupy	49
7.2.1	Teploty jádra a cívek	49
7.2.2	Teplota oleje, žeber	52
7.2.3	Rychlost a směr proudění oleje	54
7.2.4	Tlak oleje.....	60
7.2.5	Teplota obalu transformátoru	61
7.2.6	Součinitel přestupu tepla	63
7.3	Rozložení teplot v řezu transformátoru	64
7.4	Porovnání dosažených výsledků s analytickými výpočty	67
8.	Závěr	68
9.	Literatura	70
10.	Přílohy	71

1. Úvod

Transformátor je elektrický netočivý stroj sloužící k přeměně elektrické energie, k jejímu přenosu i rozvodu. Je založen na principu elektromagnetické indukce - převádí bez pohybu elektromagnetickou indukci střídavé nebo přerušované proudy. Transformátor je složen z magnetického obvodu (jádra) a elektrického obvodu (vinutí).

Prochází-li vodičem s určitým odporem elektrický proud, vznikají v něm v každém okamžiku tepelné ztráty. Teplo vzniká v magnetickém i v elektrickém obvodu a také v dalších částech transformátoru. Pokud se transformátor zahřívá, může teplota některých jeho částí překročit dovolenou mez. Oteplení je hlavním faktorem omezujícím výkon transformátoru při dlouhodobých otepleních. Transformátory je proto nutné chladit. Podle druhu chladicího média se transformátory dělí na olejové a vzduchové, chlazené přirozenou nebo umělou ventilací.

Těleso, které má svoji teplotu vyšší než je teplota okolí, předává své teplo do okolí. V tomto případě jde o přirozené chlazení teplých těles vzduchem. Předávání tepla z povrchu tělesa do okolí probíhá obecně sáláním, vedením a prouděním. Sálání však většina kapalin nepropouští, proto se předávání tepla v kapalinách uskutečňuje jen vedením a prouděním. Vedením se ohřívá vrstvička média, která přiléhá k povrchu tělesa, které teplo předává. Tekutina má těsně u povrchu stejnou teplotu jako těleso. Ohřátím se však objem média zvětší, jeho hustota se zmenší. Rozdíl tíhy studeného a teplého prostředí vyvolá vztlak, který – podle Archimédova zákona – působí na ohřátý objem směrem proti zemské tíži. Ohřáté prostředí se začne pohybovat vzhůru a na jeho místo přitéká studené prostředí. Děj se opakuje. Prouděním se zintenzivňuje odvod tepla z povrchu tělesa.

Teplo vzniklé v magnetickém obvodu nebo ve vinutí, které se dostává na povrch těchto částí, je buď rozvedeno do okolí (chlazení vzduchem) nebo odváděno olejem (chlazení olejem). Z ploch, kterým bylo teplo předáno, je teplo odváděno do okolí nebo vodními chladiči. Využívá se tedy chlazení s umělým ofukováním nebo s nuceným oběhem chladicího média.

Jak se zahřívají jednotlivé části transformátoru a k jakým tepelným procesům dochází uvnitř i na vnějšku transformátoru, je dnes možné simulovat díky výpočetním softwarům. Dříve spočíval postup konstrukce ve výrobě prototypu zařízení s několika kombinacemi základních prvků a následným zkoušením byla vybrána optimální varianta. Dnes, díky moderním výpočetním softwarům, jako je například komerční program Ansys, využívající metodu konečných prvků, je v krátkém čase možno simulovat na vytvořeném numerickém modelu jeho chování v reálných podmínkách. To vede ke zjednodušení, rychlejšímu návrhu a v neposlední řadě i efektivnějšímu využití financí, což je v době hospodářské recese velice žádoucí.

2. Podstata a funkce jednofázového transformátoru

2.1 Definice

Transformátor je netočivý elektromagnetický stroj, který využívá elektromagnetickou indukci k převodu elektrické energie o určitém napětí na elektrickou energii o jiném, popř. stejném napětí. Transformátor je definován jako netočivý elektromagnetický stroj, převádějící bez pohybu elektromagnetickou indukci střídavé nebo přerušované proudy, přiváděné do jedné obvodu ve střídavé proudy nebo proudové impulsy odebírané z druhých obvodů.

2.2 Použití

Transformátor se používá pro přenos i rozvod elektrické energie a také pro přeměnu elektrického proudu v průmyslových zařízeních, spojích v radiotechnice, automatizačních a regulačních zařízeních aj.

Jmenovité výkony a napětí transformátorů se tudíž pohybují ve velice širokých mezích. A to od zlomků voltampérů a voltů až do stovek megavoltampérů a stovek kilovoltů. Na výkonu, napětí a účelu transformátoru závisí jeho konstrukce. Transformátory se staví na kmitočet 50Hz, popř. i na jiné kmitočty, což závisí na jejich použití.

2.3 Typy

Přenos elektrické energie pomocí transformátoru je možný v obou směrech. Většinou je transformátor používán jen v jednom směru energie. Proto lze transformátory rozdělit na:

- a) zvyšovací
- b) snižovací
- c) s přenosem energie v obou směrech

Do první skupiny patří elektrárenské transformátory vyznačující se velkým výkonem (stovky MVA) a velkým vstupním napětím (stovky kVA).

Do druhé skupiny patří síťové transformátory s výkonem desítek až stovek MVA, které snižují velmi vysoké napětí hlavní přenosové sítě (220 kV, 400 kV) na vysoké napětí (22 kV, 35 kV). Dále zde patří distribuční transformátory s výkonem desítek až stovek kVA tvořící nejpočetnější skupinu energetických transformátorů, jelikož snižují vysoké napětí na nízké 0,525 kV ; 0,4 kV a 0,231 kV.

Ve třetí skupině jsou tzv. spojovací transformátory umožňující spojení dvou nezávislých sítí, např. 400 kV a 220 kV, čímž docílíme hospodárného využití výkonu z jedné soustavy do druhé a naopak. Tyto transformátory jsou vyráběny jako autotransformátory.

Existují provozy, které vyžadují zvláštní transformátory. Sem se řadí transformátory pecové, zkušební a svařovací. [3]

2.4 Princip činnosti

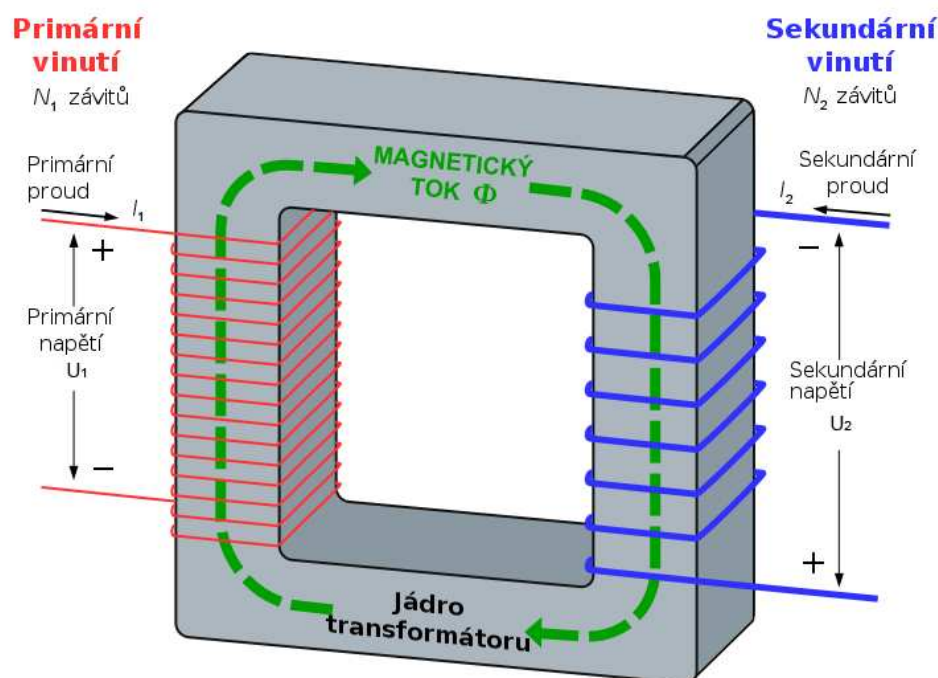
Transformátor je založen na principu elektromagnetické indukce. Přiložíme-li na svorky vstupního vinutí střídavé napětí, pak tímto vinutím poteče proud, který vyvolává v magnetickém obvodu transformátoru střídavý magnetický tok ϕ . Předpokládáme-li dokonalý magnetický obvod a rozpojené výstupní vinutí, pak je celý magnetický tok ϕ vybuzený amperzávity vstupního vinutí spřažen s výstupním vinutím, v němž se indukuje v každém okamžiku elektromotorická síla

$$e_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} . \quad (1)$$

Napětí na vstupních svorkách je v rovnováze s indukovanou elektromotorickou silou e_1 , zanedbáme-li nepatrný úbytek napětí způsobený magnetizačním proudem na odporu vstupního vinutí

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} , \quad (2)$$

kde: e_1, e_2 – okamžité hodnoty elektromotorických sil,
 ϕ – okamžitá hodnota magnetického toku,
 t – čas,
 N_1, N_2 – počet závitů vstupního a výstupního vinutí. [3]



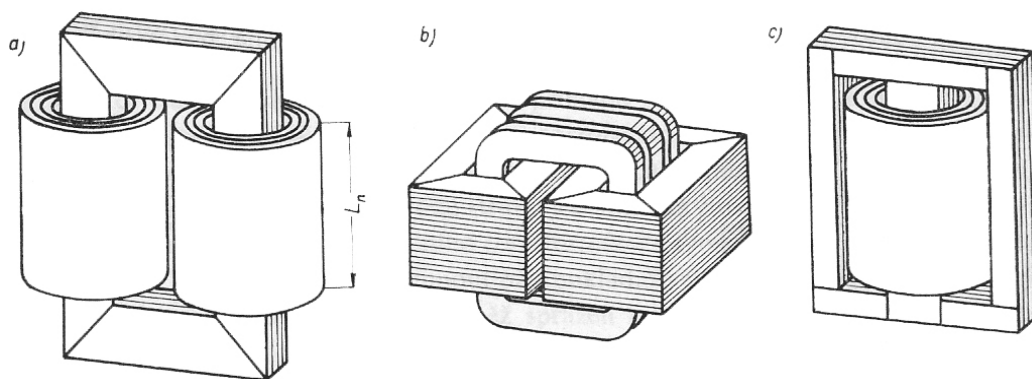
Obr. 1 – Princip činnosti transformátoru. [15]

2.5 Magnetický obvod transformátoru

Magnetický obvod transformátoru je jádro, složené ze speciálních pásů, které jsou od sebe vzájemně izolovány. Nazývají se transformátorové plechy. Jejich tloušťka obvykle bývá 0,35 nebo 0,5 mm s přísadou křemíku.

Existuje několik provedení jednofázového transformátoru, viz Obr. 2:

- a) jádrový transformátor – vinutí je rozděleno na dvě stejně velké části a každá z nich je navinuta na magnetický obvod určité délky
- b) plášťový transformátor – zde je vinutí obklopeno pláštěm z transformátorových plechů
- c) jádrovo-plášťový transformátor – jde o provedení řadící se mezi obě předchozí.



Obr. 2 – Druhy provedení jednofázového transformátoru. [1]

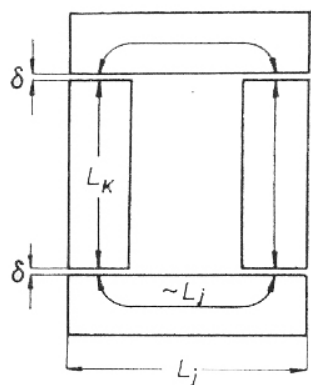
Části magnetického obvodu obklopené vinutím nazýváme jádra. Jádra jsou spojena spojkami, které slouží také ke zmenšení magnetického odporu v cestě magnetického toku φ .

Plášťová konstrukce se používá hlavně u transformátorů s velkými výkony.

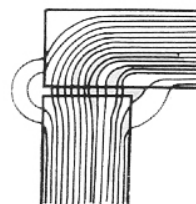
2.6 Základní tvary magnetických obvodů jednofázových transformátorů

Nejjednodušší provedení magnetického obvodu jednofázového transformátoru je:

- a) jádra a spojky jsou spojeny natupo, viz Obr. 3a
- b) vystřížené úzké obdélníky jádrových a spojkových plechů do sebe vzájemně zapadají – tzv. přeplátování, viz Obr. 4.

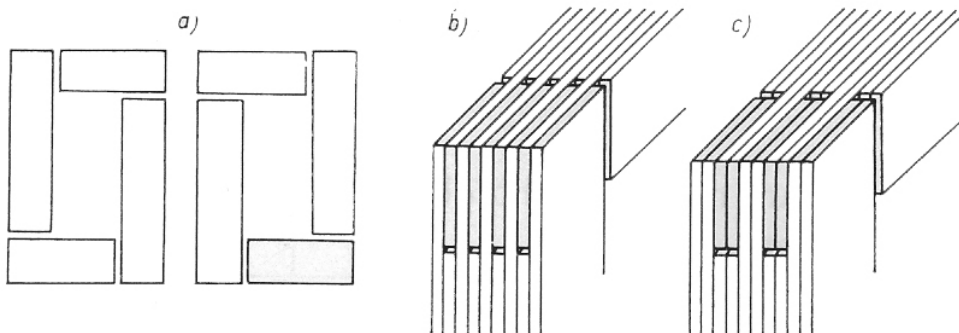


Obr. 3a – Magnetický obvod jednofázového transformátoru s jádry a spojkami spojenými natupo. [1]



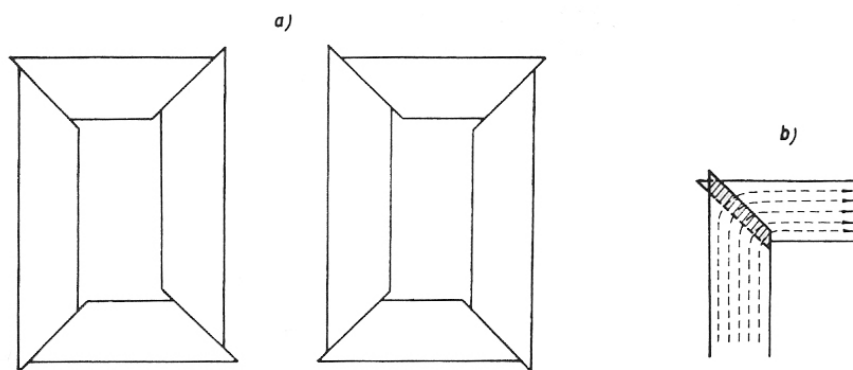
Obr. 3b – Rozložení siločar magnetického toku při průchodu vzduchovou mezerou. [1]

Výhodou konstrukcí s tupým stykem je poměrně jednoduchá montáž a demontáž magnetického obvodu a vinutí. Mají ale i podstatné nedostatky. Ve stykových místech mohou vzniknout značné vířivé proudy, způsobené překrytím plechů spojky a jádra. Vířivé proudy mohou způsobit značné ohřátí železa v místech styku. Proto se mezi jádra a spojky vkládají pevné tenké izolační vložky z teplovzdušného materiálu. Tento způsob konstrukce se používá jen zřídka, zpravidla pro tlumivky. [1]



Obr. 4 – Jednofázový magnetický obvod přeplátovaný pod úhlem 90°: a) dvě následující vrstvy, b) přeplátování po jednom plechu, c) přeplátování po dvou pleších. [1]

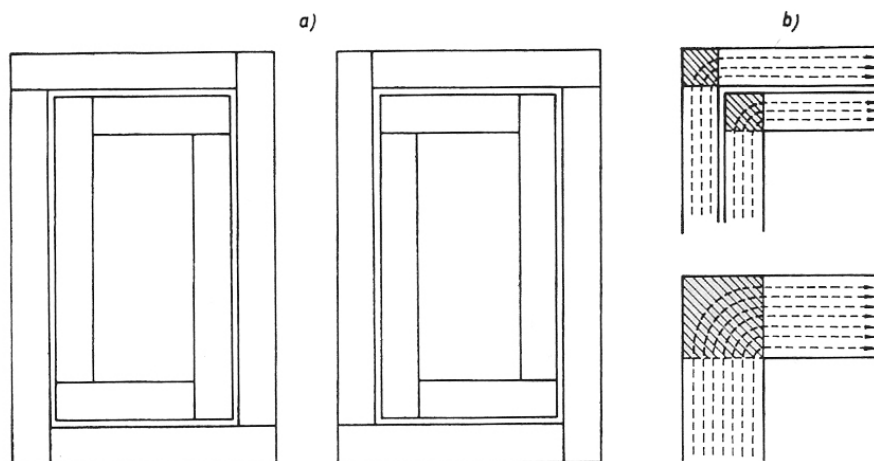
Rovněž v přeplátovaných konstrukcích vzniká v místech spojení jader a spojek úbytek magnetického napětí a dodatečné ztráty v železe, jsou však podstatně menší.



Obr. 5 – Magnetický obvod přeplátovaný pod úhlem 45° : a) dvě následující vrstvy, b) průběh siločar v rozích. [1]

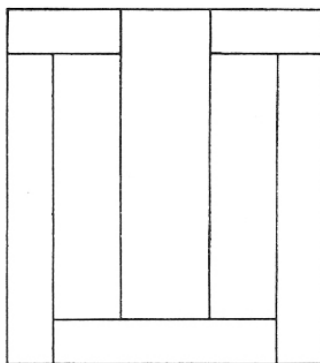
U tohoto typu přeplátování čárkovaná plocha značí prostor, kde jsou směry válcování a magnetizace totožné. Nesouhlas směrů magnetizace a válcování se zde objevuje v poměrně malém objemu, viz Obr. 5b.

Magnetické obvody jednofázových transformátorů velkých výkonů, u kterých průměry jader dosahují 1 m i více, se provádějí jako dvoutrámové, viz Obr. 6. Výhodou je ulehčení zaplechování a rozplechování vrchní spojky. Tato konstrukce také přispívá k lepšímu chlazení magnetického obvodu. Vzdálenost od jeho nejteplejších vnitřních míst k povrchu, omývanému olejem, se zmenší dvakrát. Současně se dvojnásobně zmenší množství tepla odváděného z těchto ploch.



Obr. 6 – Dvoutrámový magnetický obvod: a) přeplátování, b) srovnání dvoutrámového magnetického obvodu s jednorámovým. [1]

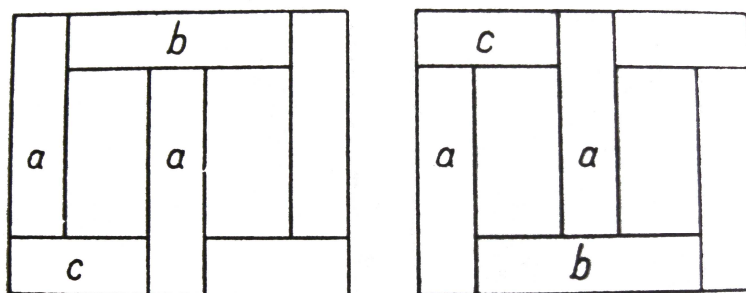
Na Obr. 7 je zobrazen magnetický obvod jednofázového plášťového transformátoru přeplátovaného pod úhlem do 90° .



Obr. 7 – Magnetický obvod jednofázového plášťového transformátoru. [1]

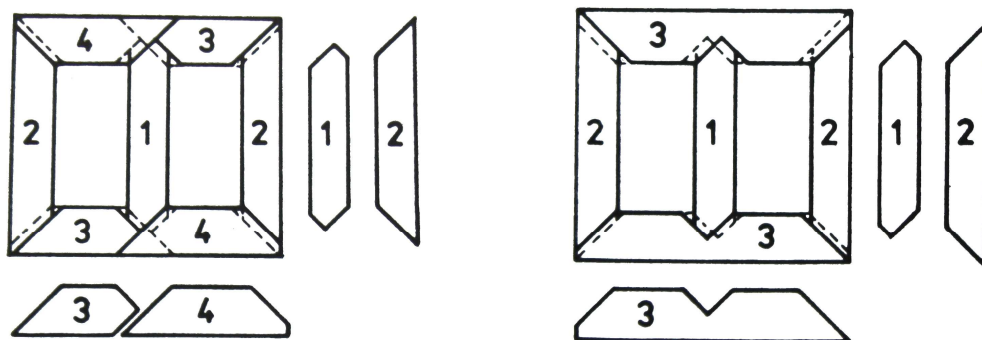
2.7 Základní tvary magnetických obvodů trojfázových transformátorů

Trojfázové transformátory mají jádro skládané z pásků, viz Obr. 8. V každé vrstvě a pro každý stupeň má trojfázové trafo tři druhy plechů: a,b,c. Dělicí spáry se překládají. Nejlepší je překládat každou vrstvu, ale pro zlevnění výroby se do vrstvy dávají dva i více plechů.



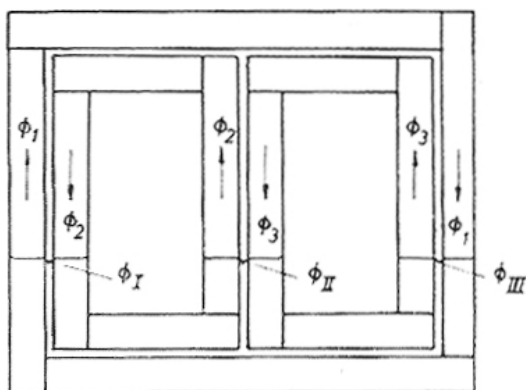
Obr. 8 – Dvě následující vrstvy plechů trojfázového magnetického obvodu transformátoru, přeplátované pod úhlem 90° . [4]

Magnetické obvody transformátorů se skládají i z orientovaných plechů, které mají lepší magnetické vlastnosti ve směru válcování plechů oproti kolmému směru. Ztráty v železe a úbytky magnetického napětí jsou v místech ohybu indukčních siločar při jejich přechodu z jádra do spojky větší než ve vlastním jádře a spojkce. Tento jev se dá částečně odstranit použitím zkosených listů plechů a zvláštním způsobem přeplátování, i když je konstrukce složitější, viz. Obr. 9.



Obr. 9 – Skládání trojfázového magnetického obvodu z orientovaných plechů se šikmým stykem. [4]

Na Obr. 10 je znázorněn trojfázový magnetický obvod ve dvoutrámovém provedení. Objem části magnetického obvodu, ve kterém směr magnetických siločar není totožný se směrem válcování, je zde dvakrát menší než u provedení s přeplátováním pod úhlem 90° .



Obr. 10 – Trojfázový dvoutrámový magnetický obvod transformátoru. [1]

2.8 Elektrický obvod

Elektrický obvod je složen z několika vinutí. U jednofázových transformátorů bývají nejčastěji dvě. U dvouvinutového transformátoru rozlišujeme vstupní vinutí, které odebírá energii ze sítě, a výstupní, které energii předává spotřebiči. Každé vinutí však může plnit úlohu jak vstupního, tak výstupního vinutí, záleží jen na směru toku energie. Proto se jedno nazývá vinutí nižšího napětí, druhé pak vinutí vyššího napětí. Každé vinutí musí být dimenzováno z hlediska tepelného, mechanického a izolačního namáhání.

Podle způsobu uspořádání vinutí na jádře rozdělujeme vinutí na:

- a) sousedé (válcové), viz Obr. 11a
- b) vystřídáné (kotoučové), viz. Obr. 11b.

výstupního vinutí nakrátko a napětí vstupního vinutí U_1 se při jmenovitém kmitočtu postupně zvyšuje od nuly do hodnoty, při které je proud ve vinutí roven jmenovitému. [2]

2.11 Chod při zatížení

Transformátor je zatížen, to znamená, že mezi svorky výstupního vinutí je připojen určitý odpor. Tímto vinutím tedy poteče proud. Napětí vstupního vinutí U_1 má konstantní hodnotu, rovnající se součtu indukované elektromotorické síle e_1 a úbytku napětí na odporu primárního vinutí. V normálních transformátorech je tento úbytek napětí malý, pokud je zatížení transformátoru v mezích jmenovitého výkonu. Lze říci, že se elektromotorická síla e_1 při změnách zatížení mění jen málo.

V chodu naprázdno je magnetický tok φ vyvolán magnetomotorickou silou (ampérvávitů). Při zatížení vznikne v transformátoru dodatečná magnetomotorická síla působící proti původnímu magnetickému toku. Protože má magnetický tok konstantní velikost, objeví se v magnetomotorické síle výstupního vinutí složka kompenzující v každém okamžiku vliv ampérvávitů sekundární strany. Z toho plyne, že každému vzrůstu sekundárního proudu odpovídá vzrůst primárního proudu tak, aby primární ampérvávitů kompenzovaly zeslabující vliv sekundárních ampérvávitů a taky vytvořily magnetický tok odpovídající velikosti toku při chodu naprázdno. [1]

2.12 Ztráty transformátoru

Transformátor má ztráty v železe, ve vinutí a ztráty přídatné. Ztráty v železe se rovněž nazývají ztráty naprázdno, jelikož se určují pokusem naprázdno. Ve skutečnosti jsou ztráty naprázdno také malé ztráty v mědi magnetizačním proudem. Ztráty v mědi se nazývají ztráty nakrátko, jelikož se naměří při měření nakrátko. Velikost ztrát v železe a mědi a jejich vzájemný poměr mají důležitý hospodářský význam a proto jsou předepsány normami. Přídatné ztráty jsou v železe i vinutí transformátoru a v konstrukčních částech. Přídatné ztráty v konstrukčních částech se určují obtížně. Význam mají především u transformátorů velkých výkonů. [4]

Celkové ztráty představují výkon spotřebovaný magnetickým materiálem při jeho střídavém magnetování. Celkové ztráty se dělí na ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy a ztráty zbytkové. Projevem těchto ztrát je zahřívání magnetického obvodu.

Hysterezní ztráty vznikají při střídavé magnetizaci a jsou úměrné velikosti plochy hysterezní smyčky.

Ztráty vířivými proudy vznikají při změně magnetické indukce při střídavém magnetování v kovových feromagnetických materiálech. Tyto ztráty se dají zmenšit použitím materiálu s velkou rezistivitou a malou tloušťkou plechu. Tímto materiálem jsou ferity nebo křemíková ocel, u níž se přísadou křemíku zvětší původní rezistivita oceli až šestinásobně. Zmenšení ztrát vířivými proudy dosáhneme také skládáním magnetických jader ze vzájemně izolovaných tenkých plechů. Zmenšování tloušťky plechu je však omezeno ekonomickými důvody.

Ztráty ve vinutí vznikají při provozu transformátoru v primárním i sekundárním vinutí. Ztráty ve vinutí rostou s druhou mocninou proudu vinutím a rovněž rostou lineárně s odporem

vinutí. Zmenšení odporu vinutí dosáhneme zvětšením průřezu vodiče. Je-li transformátor zatížený, vede zvětšení průřezu vodiče ke snížení celkových ztrát. [9]

3. Oteplování a chlazení transformátoru

Elektrická energie ztracená v transformátoru při přeměně střídavého proudu se přeměňuje v teplo v magnetickém obvodu, ve vinutí a jiných částech transformátoru. Transformátor se zahřívá a teplota jeho jednotlivých částí může značně překročit teplotu okolí. Oteplení transformátoru roste se zvětšujícím se zatížením a se ztrátami v něm vznikajícími. Závisí tedy na intenzitě chlazení magnetického obvodu, vinutí a ostatních zahřívaných částech. Oteplení transformátoru je hlavním faktorem omezujícím jeho výkon při dlouhodobých otepleních.

Za provozu jsou plechy magnetického obvodu transformátoru a měď vinutí stálými zdroji tepla. Z tohoto důvodu dochází v magnetickém obvodu a ve vinutí ke sdílení tepla tepelnou vodivostí z vnitřních teplejších částí k vnějšímu povrchu, ze kterého se teplo odvádí. [2]

3.1 Druhy transformátorů podle chladicího média

Podle chladicího média rozdělujeme transformátory na olejové a vzduchové. S ohledem na horší chladicí poměry vycházejí aktivní materiály u vzduchových transformátorů větší a dražší. Olejový transformátor má nádobu, jejíž povrch bývá podle velikosti transformátoru buď hladký nebo má radiátory, případně je transformátor vybaven chladičem a nucenou cirkulací chladicího oleje. [1]

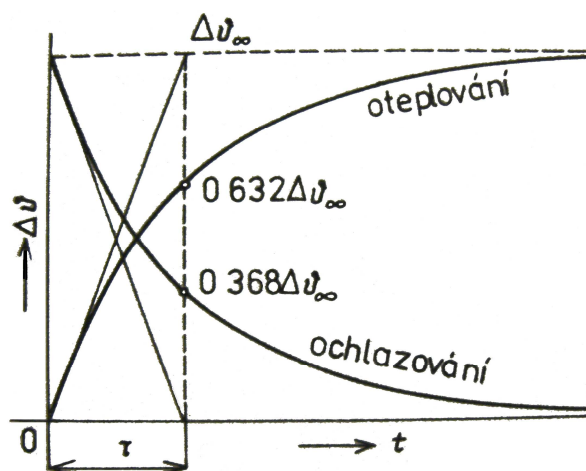
3.2 Tepelné účinky elektrického proudu – oteplování proudovodiče

Jestliže úsekem dlouhého vodiče s odporem R (Ω) prochází elektrický proud I (A), tak v něm v každém časovém okamžiku dt vznikají tepelné ztráty $dQ = RI^2 dt$. Vzniklé teplo se dělí na dvě části. Jedna část je odvedena ochlazováním ve stejné době do okolí. Jedná se o množství $\alpha_0 A dt$. Veličina α_0 ($W/m^2 \cdot K$) je nazývána součinitel přestupu tepla, veličina A (m^2) je ochlazovací povrch úseku a veličina $\Delta\vartheta$ (K) je okamžité oteplení tělesa proti okolí. Druhá část tepla pak v tělese zůstává a zvyšuje jeho teplotu o $d\vartheta$. Množství spotřebovaného tepla určuje vztah $cVd\vartheta$. Veličina c ($J/m^3 \cdot K$) je objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku vodiče s objemem V (m^3). Platí tedy rovnice

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cVd\vartheta. \quad (3)$$

Křivka časového průběhu oteplení má exponenciální charakter, viz Graf 1. Oteplení narůstá z počáteční nulové hodnoty stále pomaleji, až se za dobu $t \rightarrow \infty$ ustálí na hodnotě maximálního oteplení $\Delta\vartheta_\infty$. Časovou konstantu τ (s) je možné definovat jako dobu,

za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení $\Delta\vartheta_{\infty}$, jestliže by se veškeré uvolněné teplo spotřebovalo pouze na zvyšování jeho teploty, tj. kdyby bylo $\alpha_0 = 0$.



Graf 1 – Oteplovací a ochlazovací charakteristika. [5]

Není pravdou, že se časová konstanta během oteplování nemění. Součinitel přestupu tepla α_0 je (mírně) závislý na oteplení $\Delta\vartheta$ a během oteplování se mění. Zároveň se může měnit i objemová tepelná kapacita c . To je důvod, proč zpravidla zcela přesně nesouhlasí měřená oteplovací křivka s křivkou vypočítanou.

Prochází-li vodičem stále stejný proud po velmi dlouhou dobu, dosáhne těleso teplotně ustáleného stavu. V ustáleném stavu je $\Delta\vartheta/dt = 0$ a $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty}$. Proto rovnice nabude tvaru

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta\vartheta_{\infty}. \quad (4)$$

Jestliže se dosáhne tohoto nejvyššího možného oteplení povrchu tělesa za daných podmínek, nastává tepelná rovnováha. To znamená, že veškeré teplo vznikající ve vodiči se předává jeho povrchem do okolí – zpravidla do ovzduší. [5]

3.3 Způsoby přenosu tepla

Jednotlivé části transformátoru můžeme z tepelného hlediska rozdělit na dvě skupiny:

- a) takové, v nichž se teplo vytváří – vinutí, magnetické jádro
- b) takové, jenž teplo pouze přenášejí – vrstvy izolace, stěny nádoby.

Teplo se šíří z místa vzniku do okolí, a to třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí), sáláním (zářením, radiací). V cestě tepelnému toku z transformátoru ven „stojí“ tuhá, tekutá a plynná tělesa. Tepelný tok tuhými tělesy se šíří vedením. Tekutým prostředím (olejem) převážně prouděním, vedením jen částečně. Plynným prostředím (vzduchem) se tepelný tok šíří všemi třemi způsoby, ale vedením jen v omezeném rozsahu.

Ve vakuu se šíří teplo jen sáláním. Navíc vnější povrch transformátoru předává teplo do okolního prostředí sáláním.

Matematicky exaktně lze zachytit šíření tepla jen tehdy, probíhá-li jen vedením nebo jen zářením. K tomu je nutný předpoklad homogenity prostředí. Prakticky se jedná o případ vedení tepla látkou nebo jeho šíření v plynech a ve vakuu zářením.

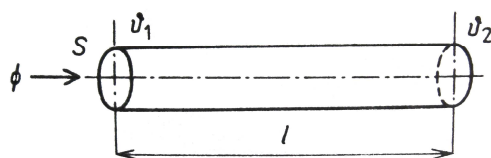
V takovémto stejnorodém prostředí se vytváří tepelné pole, které je skalárním. Jeho potenciální veličinou je teplota ϑ ($^{\circ}\text{C}$), popř. Θ (K) nebo oteplení $\Delta\vartheta$ (K). Její rozložení v prostoru se zdroji popisuje Poissonova rovnice, v prostoru bez zdrojů Laplaceova rovnice. Řešení tepelných polí je tak analogickým řešením polí elektrických. Analogicky však jen do jisté míry, neboť rozdíl mezi tepelnou vodivostí kovů izolantů je o několik řádů menší oproti jejich elektrickým vodivostem. Izolanty jsou z tepelného hlediska izolanty prostředí, kterým na rozdíl od elektrického hlediska odchází do okolí značná část tepla. Tvary polí se v obou případech liší. V praxi lze ale tuto analogii uplatnit a často spočítat tepelný tok podle vztahů jako vzorce pro vedení proudu v elektrických obvodech.

Určuje-li v elektrickém obvodu velikost proudu Ohmův zákon, je jeho obdobou pro výpočet tepelného toku Φ tepelným vodičem délky l (m) a průřezu S (m^2), vztah:

$$\Phi = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{\vartheta}} = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}} \quad (5)$$

Přitom $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ (K) je teplotní rozdíl, který na tepelném odporu R_{ϑ} (K/W) vyvolá tepelný tok Φ (W). Při součiniteli tepelné vodivosti materiálu λ (W/m.K) má tyč konstantního průřezu, viz Obr. 12, tepelný odpor:

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad (6)$$

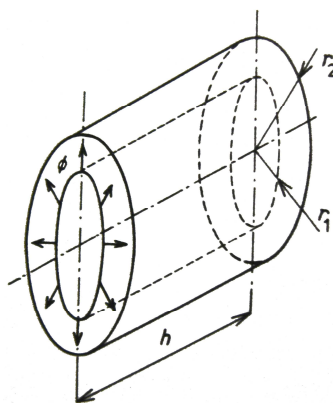


Obr. 12 – Tepelný tok tyčí konstantního průřezu. [5]

Přepíšeme-li předchozí rovnici do diferenciálního tvaru

$$dR_{\vartheta} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dl}{S}, \quad (7)$$

získáme výchozí vztah pro výpočet tepelného odporu tělesa jakéhokoli tvaru, známe-li analytické vyjádření změny průřezu po délce ve směru tepelného toku. Častým útvarem v tepelných obvodech je válcová vrstva, viz Obr 13.



Obr. 13 – Radiální tepelný tok válcovou vrstvou. [5]

Pomocí předchozího vztahu lze pro její tepelný odpor $R_{\vartheta r}$ radiálním směrem dospět integrací v mezích r_1, r_2 ($dl = dr, A = 2\pi rh$) k rovnici:

$$R_{\vartheta r} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi\lambda h} \quad (8)$$

[1], [5].

3.4 Použití Newtonovy formule pro výpočet přestupu tepla z povrchu teplého tělesa do okolního prostředí

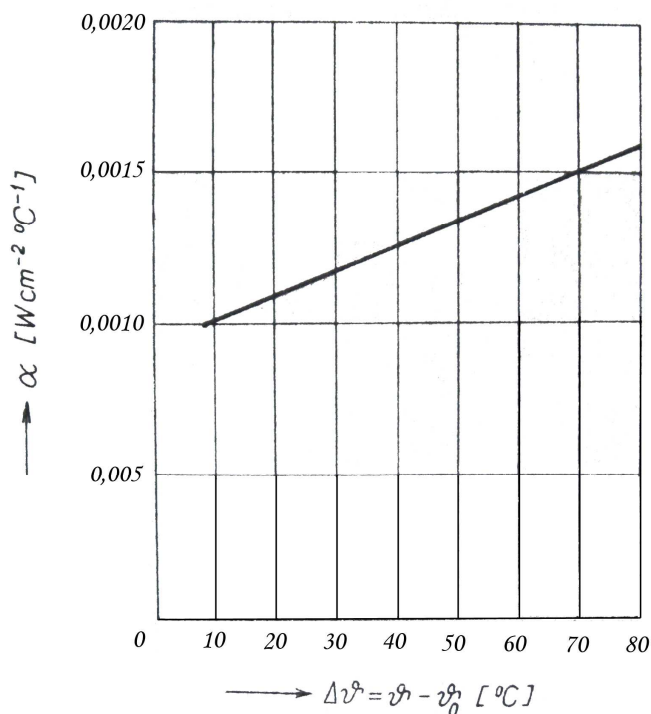
V elektrotechnické praxi je často nutné stanovit oteplení povrchu určitého tělesa vzhledem k okolnímu prostředí, které obsahuje plyn nebo kapalinu. Nejvhodnějším způsobem se jeví výpočet podle Newtonovy rovnice

$$P = \alpha \cdot S \cdot (\vartheta - \vartheta_o) \quad , \quad (9)$$

kde P – jsou tepelné ztráty odevzdané do prostředí prouděním a sáláním (W)
 S – povrch tělesa předávající teplo (m^2)
 ϑ – teplota povrchu tělesa ($^{\circ}C$)
 ϑ_o – teplota prostředí ($^{\circ}C$)
 α – součinitel přestupu tepla respektující popřípadě vliv proudění i sálání ($W/m^2.K$)

Součinitel přestupu tepla α představuje ztráty ve wattch, které odevzdá okolnímu prostředí $1 m^2$ chladícího povrchu tělesa při rozdílu teploty tělesa a prostředí $1 ^{\circ}C$. Součinitel přestupu tepla α závisí na fyzikálních vlastnostech – měrné tíži, hustotě, tepelné vodivosti, viskozitě, tepelné kapacitě kapalného nebo plynného prostředí, tvaru a umístění tělesa, způsobu opracování jeho povrchu aj.

Newtonova formule vyžaduje správnou volbu součinitele přestupu tepla α . To lze učinit jen na základě dostatečného množství věrohodných pokusů s přestupem tepla v různých prostředích.

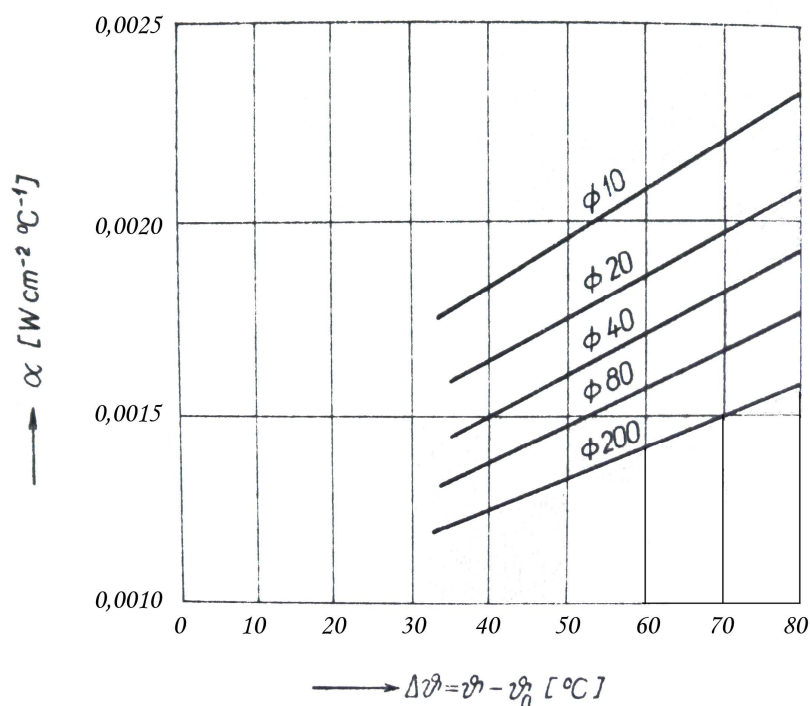


Graf 2 – Závislost součinitele přestupu tepla pro natřenou kovovou tyč o průřezu 120 x 10 mm na teplotě okolí. Deska je postavena na výšku. Rychlost okolního vzduchu $v = 0$. [6]

Uvedený graf udává závislost součinitele přestupu tepla α na oteplení pro natřenou kovovou tyč obdélníkového průřezu 120 x 10 mm, umístěnou na ležato. Křivku lze popsat rovnicí

$$\alpha = 0,92 \cdot 10^{-3} \cdot [1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

Následně se určí součinitel přestupu tepla α při různém oteplení vodorovně uložených válcových vodičů daného průměru za předpokladu šíření tepla volnou konvekcí a teploty vzduchu 35 °C.



Graf 3 – Závislost součinitele přestupu tepla na oteplení vzhledem k okolí pro vodorovný váleček průměru 10 mm až 200 mm. Rychlost okolního vzduchu $v = 0$. [6]

Pro válcové vodiče je udaná závislost přibližně lineární a lze ji popsat následující rovnicí a součinitel k_1 a k_2 se volí podle průměru vodiče, viz Tab. 1.

$$\alpha = k_1 \cdot 10^{-3} \cdot [1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot (t - t_0)] \quad (\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (11)$$

Průměr vodiče (mm)	k_1	k_2
10	1,24	1,14
40	1,11	0,88
80	1,08	0,75
200	1,02	0,68

Tab. 1 – Hodnoty součinitelů pro různé průměry vodičů. [6]

Pro praktické návrhy je velmi důležitý výpočet oteplení cívek elektrických přístrojů. Na základě velkého počtu pokusů, prováděných s různými válcovými cívkami, lze uvést následující přibližný postup při volbě součinitele α .

V případě, kdy má povrch cívky S_c , kterým prochází tepelný proud, velikost v rozmezí $1 < S_c < 100 \text{ cm}^2$, platí vztah

$$\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1 + 0,005 \cdot (\vartheta - \vartheta_0)}{\sqrt[3]{S_c}} \quad (\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (12)$$

Pro případ, kdy $100 < S_c < 5000 \text{ cm}^2$, platí vztah

$$\alpha = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1 + 0,005 \cdot (\vartheta - \vartheta_0)}{\sqrt[3]{S_c}} \quad (\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (13)$$

Uvažuje-li se fyzikální podstata sdílení tepla přestupem, dochází se k závěru, že závislost $\alpha = f(S_c)$ v předchozích rovnicích neodpovídá přesně skutečnosti. Tyto vztahy je možné v praxi použít, ale jejich rozbor je velmi pracný.

Uváděné údaje součinitele přestupu tepla α platí pouze za předpokladu konstantního oteplení. Mění-li se s časem oteplení povrchu tělesa, mění se i okamžitá hodnota součinitele přestupu tepla α . Výpočty se však zjednodušují přijetím předpokladu, že velikost součinitele přestupu tepla α zůstává během celého přechodného tepelného děje konstantní a za základ výpočtu se považuje Newtonův vztah uvedený výše. Lze jej také přepsat do tvaru

$$P = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\frac{1}{\alpha \cdot S}}, \quad (14)$$

který se podobá Ohmovu zákonu pro elektrický proud. Výraz $\frac{1}{\alpha \cdot S}$ představuje tepelný odpor při přestupu tepla z povrchu S do okolního prostředí. Oteplení $(\vartheta - \vartheta_0)$ je při tom konstantní a s časem se nemění. [6]

3.5 Sálání a přirozená konvekce

Stroje s umělou ventilací a uzavřené stroje s přirozenou ventilací mají převážnou část tepelných ztrát odváděnu tokem vzduchu, který proudí skrz stroj, případně kolem povrchu stroje. Ztráty, odváděné z povrchu stroje sáláním a z neofukovaných částí stroje sáláním a přirozenou konvekcí, tvoří jen malou část celkových ztrát. Při odhadu ztrát stačí v těchto případech hrubá znalost součinitele přestupu tepla.

Ovšem u uzavřených strojů bez vnější umělé ventilace je sálání a přirozená konvekce jedinou příčinou a možností jejich chlazení. V tomto případě je znalost přestupového součinitele tepla pro tepelný výpočet nezbytná.

Součinitel přestupu tepla je dobré znát přesněji i pro stroje uměle ventilované nebo otevřené bez umělé ventilace, kdy se jedná o ochlazování po zastavení stroje, zejména u přerušovaného chodu. Při doběhu stroje ještě nějakou chvíli proudí vzduch skrz stroj nebo kolem jeho povrchu. Po jeho zastavení je ochlazování dáno jen sáláním a přirozenou konvekcí, není-li stroj v klidu uměle ventilován nebo není-li stroj otevřený, u něhož se počítá

s mírným pohybem vzduchu, který vzniká tím, že uvnitř teplého stroje se vzduch otepluje a uniká směrem nahoru dle zákonů přirozené konvekce.

Oba jevy, sálání a přirozená konvekce, se musí uvažovat při praktickém výpočtu společně, jelikož jsou v technické praxi spolu nerozlučně spojeny. [7]

3.6 Přirozená konvekce, ustálený stav

Přestup tepla přirozenou konvekcí nastává tam, kde se oteplovaná tekutina pohybuje pouze vlivem rozdílného oteplení a v důsledku toho nestejně hustoty. Není tedy hnána uměle, jak je tomu při umělé konvekci podél tělesa, s nímž si teplo vyměňuje, pomocí čerpadel či ventilátorů.

Velmi zjednodušeně se dá odvodit všeobecný tvar rovnic, které dovolují určit závislost součinitele přestupu tepla α_{pk} pro přirozenou konvekci na hlavních veličinách následujícím způsobem: V blízkosti svislé, volně stojící teplé stěny se klidná tekutina ohřívá. Na její objemovou jednotku působí proti tíži vztlak

$$F = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot t \quad (\text{kp/m}^3), \quad (15)$$

kde je β – objemový součinitel roztažitelnosti (1/K)

g – zrychlení tíže (m/s^2)

ρ – měrná hmotnost (kp.s/m^2)

t – určitý rozdíl mezi teplotou stěny a teplotou vzdálené okolní tekutiny, která má u stěny po ohřátí menší hustotu a stoupá s působením Archimédovy síly (K).

Předpokládá se, že přestupový součinitel α_{pk} závisí na síle F , na viskozitě μ (kp.s/m^4) tekutiny, jejím měrném teple c ($\text{Ws/m}^3\cdot\text{K}$), na výšce stěny l (m), případně na jiném rozměru tělesa, a na měrné tepelné vodivosti plynu λ (W/m.K), a že vzájemnou závislost lze vyjádřit pomocí mocninového vztahu s exponenty α až ε , tedy

$$\alpha_{pk} = C_1 \cdot F^\alpha \cdot \mu^\beta \cdot c^\gamma \cdot l^\delta \cdot \lambda^\varepsilon, \quad (16)$$

kde C_1 je bezrozměrná konstanta. Aby se postup usnadnil, dělí se vztah podílem (λ/l) , čímž se obdrží vztah

$$\alpha_{pk} \cdot l / \lambda = C_1 \cdot F^\alpha \cdot \mu^\beta \cdot c^\gamma \cdot l^{\delta+1} \cdot \lambda^{\varepsilon-1}. \quad (17)$$

Výraz

$$\alpha \cdot l / \lambda = Nu \quad (18)$$

je bezrozměrný, byl nazván číslem Nusseltovým. Porovnáním rozměrů vybraných veličin na levé a pravé straně rovnice, obdržíme nejprve rozměr síly (kp), který přichází pouze v hodnotách F a μ , $\beta = \alpha$. Porovnáním času a výkonu je docíleno

$$\text{pro } (s) \quad \beta + \gamma = 0, \quad \gamma = \alpha \quad (19)$$

$$\text{pro } (w) \quad \gamma + \varepsilon - 1 = 0, \quad \varepsilon - 1 = -\alpha. \quad (20)$$

Porovnáním délkového rozměru (m) plyne

$$-3\alpha - 2\beta - 3\gamma + \delta + 1 - \varepsilon + 1 = 0, \quad (21)$$

z čehož

$$\delta + 1 = 3\alpha. \quad (22)$$

Rovnici lze tedy psát

$$Nu = C_1 \cdot \left(\frac{F \cdot c \cdot l^3}{\mu \cdot \lambda} \right)^\alpha. \quad (23)$$

Součin v poslední závorce lze rozdělit na dvě bezrozměrná čísla $\frac{F \cdot l^3}{\mu \cdot v}$ a $\frac{c \cdot v}{\lambda}$, z nichž první je číslo Grashoffovo

$$Gr = \frac{g \cdot \rho \cdot \beta \cdot t \cdot l^3}{\mu \cdot v} \quad (24)$$

a druhé je číslo Prandtlovo

$$Pr = \frac{c \cdot v}{\lambda}. \quad (25)$$

Vztah $v = \frac{\mu}{\rho}$ mezi viskozitou dynamickou μ a kinematickou dává pro Grashoffovo číslo jednodušší tvar

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot t \cdot l^3}{v^2}. \quad (26)$$

Jelikož exponent α není přímo znám, je nutné psát závislost mezi třemi použitými bezrozměrnými čísly ve tvaru

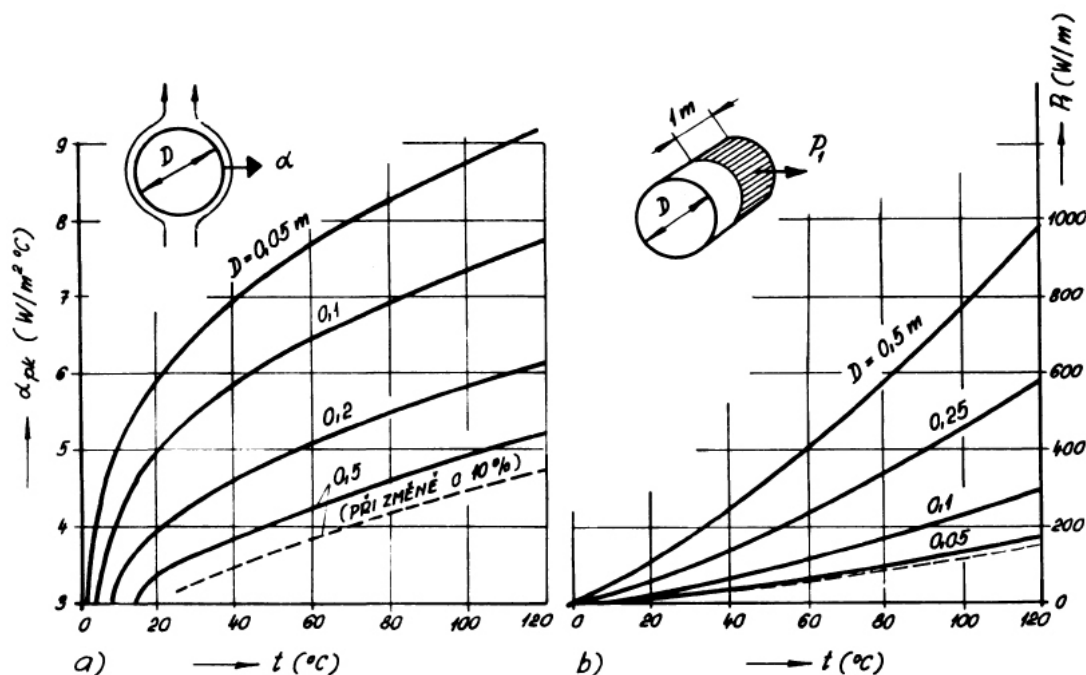
$$Nu = f(Gr \cdot Pr). \quad (27)$$

Podrobnější rozbor vede na složitější tvar závislosti $Nu = f(Re \cdot Gr \cdot Pr)$. Uvedený postup – dimenzionální analýza – nevede sice ještě k rovnicím, ze kterých by bylo možno přestupový součinitel určit, ale jsou cennou a všeobecně užívanou pomůckou, kterou se výsledky měření dají kontrolovat, srovnávat a znázorňovat. Pouze měřením lze pro každý případ, a to i pro jiné

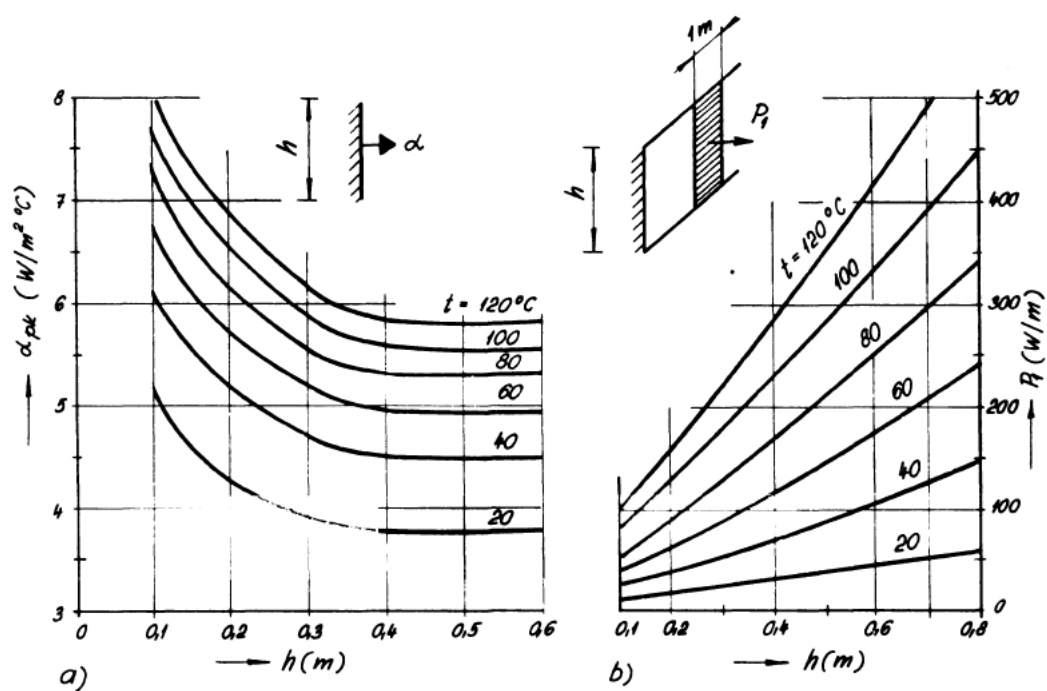
než svislé stěny, určit konstantu C_1 , jakož i tvar funkce spojující tři, případně čtyři bezrozměrná čísla.

Přirozená konvekce je podrobně zpracována pro četné a vždy jen jednoduché a přesně definované případy. Jsou známy i vztahy pro určení hodnot místních přestupových součinitelů a rychlostí v různých vzdálenostech od tělesa. Pro nízké teplotní rozdíly je v nižších partiích tělesa proudění obvykle laminární. Může však přecházet pro vyšší teplotní rozdíly a ve větších výškách i v proudění turbulentní. Podrobnější analýza se ovšem nedá aplikovat na elektrické stroje. [7]

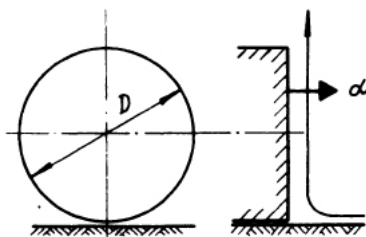
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny konvekce pro odlišné plochy, tvary a okolí.



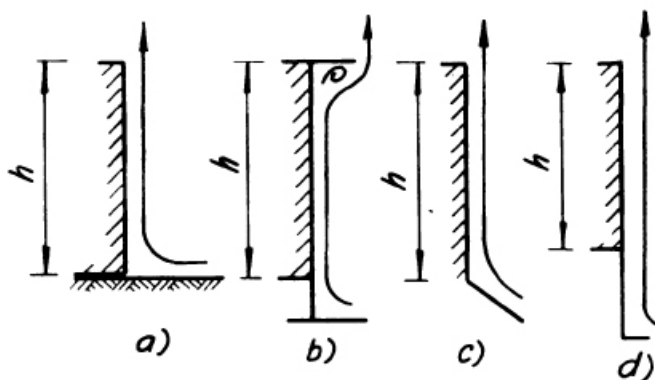
Obr. 14 – Přirozená konvekce u vodorovného válce: a) součinitel přestupu tepla, b) odvedený tepelný výkon na délce 1 m. [7]



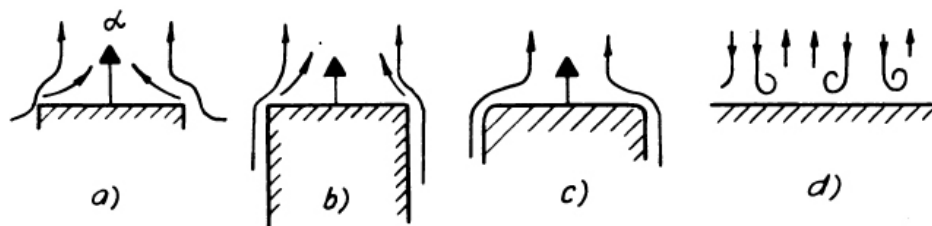
Obr. 15 – Přirozená konvekce u svislé stěny: a) součinitel přestupu tepla, b) odvedený tepelný výkon ze stěny o šířce 1 m. [7]



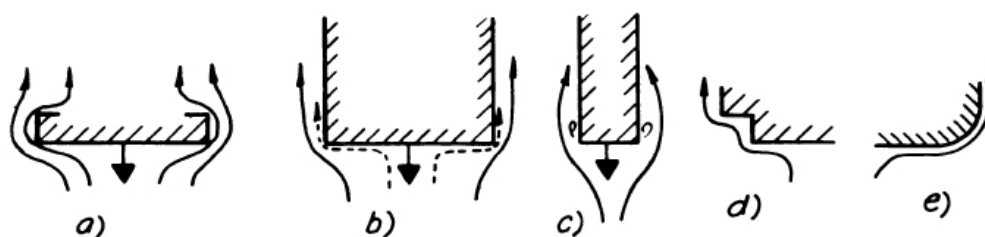
Obr. 16 – Přirozená konvekce u svislé kruhové plochy. [7]



Obr. 17 – Okolí svislé rovinné plochy při přirozené konvekci: a) normální uspořádání, b) až d) odlišné případy. [7]



Obr. 18 – Přirozená konvekce nad vodorovnou rovinnou plochou, vliv výšky tělesa a), b), zaoblení hran c), rozsáhlé plochy d). [7]



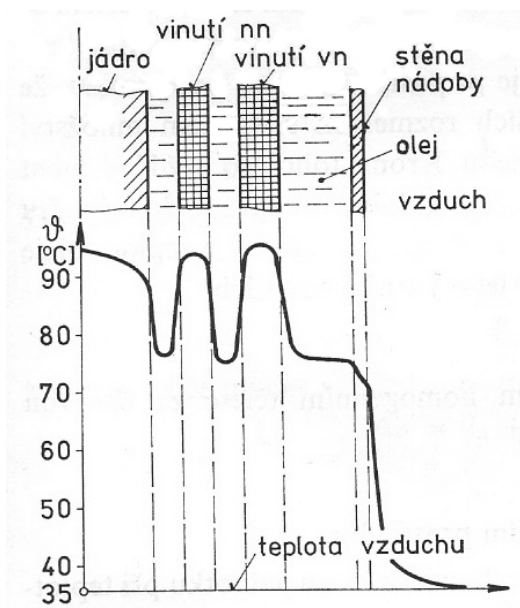
Obr. 19 – Přirozená konvekce pod vodorovnou rovinnou plochou: vliv velikosti plochy a výšky tělesa a), b), c), úpravy hran d), e). [7]

3.7 Oteplení olejového transformátoru

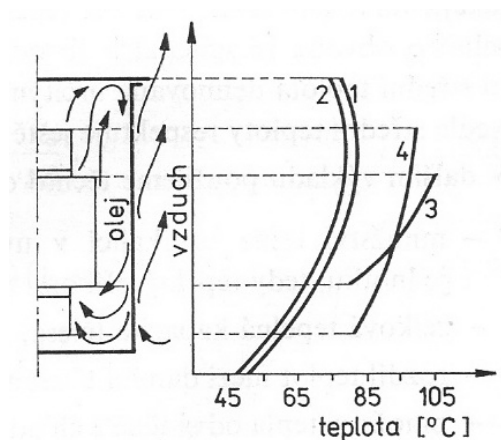
V olejových transformátorech je magnetický obvod a vinutí omýváno transformátorovým olejem. Hladina transformátorového oleje je značně výše než nejvyšší částí magnetického obvodu. Částice oleje, dotýkající se teplého povrchu magnetické obvodu a vinutí, se ohřívají, stoupají vzhůru a své teplo odevzdávají přes stěny a víko nádoby do okolí. Ochlazené částice oleje klesají dolů a uvolňují místo teplejším. Sdílení tepla se tak děje konvekcí. Mezi magnetickým obvodem a vinutím na jedné straně a olejem na straně druhé se ustálí určitý rozdíl teplot. Teploty oleje a jiných částí transformátoru jsou v různých výškách nádoby odlišné.

Na Obr. 20 je znázorněno typické rozložení teplot ve vodorovném řezu olejovým transformátorem. Teplo prochází stěnou nádoby transformátoru vedením. Přestup tepla z povrchu nádoby je vyvolán konvekcí – pohybem ohřátých, pohybujících se částic vzduchu i sáláním tepla (radiací). Teploty mezi nádobou a okolním vzduchem se mohou lišit i o několik desítek stupňů. [1]

Typický průběh změny teploty podél výšky transformátoru s přirozeným olejovým chlazením znázorňuje Obr. 21.



Obr. 20 – Rozložení teploty ve vodorovném řezu olejovým transformátorem. [2]



Obr. 21 – Rozložení oteplení oleje a povrchu vinutí vzhledem k okolí podél výšky transformátoru;
1 – teplota oleje, 2 – teplota stěny nádoby, 3 – teplota vinutí,
4 – teplota magnetického obvodu. [2]

Z diagramu lze vyvodit tyto závěry:

1. Teplota oleje v nádobě transformátoru roste od určitého minima na dně nádoby, lišícího se o několik stupňů od teploty okolí, do maximální hodnoty – přibližně do výšky horního okraje vinutí. Tato maximální teplota se víceméně udržuje v celé hmotě oleje nad vlastním transformátorem.
2. Křivka rozložení teploty povrchu vinutí má v určité výšce charakteristický tvar svědčící o tom, že od tohoto místa je vinutí chlazeno intenzivněji. Je to místo, v němž se laminární proudění oleje mění v turbulentní.
3. Teplotní spád z vinutí na olej se nepatrně mění podél výšky vinutí. [1]

3.8 Stárnutí izolace

Průchod proudu ve vinutích a stálé přemagnetizování magnetického obvodu způsobuje ztráty. Ztráty se mění v teplo a oteplují jednotlivé části transformátoru.

Oteplení nesmí přesáhnout určitou mezní velikost, aby se zajistil bezpečný a spolehlivý provoz zařízení. Hlavním činitelem je zde teplotní odolnost použitých izolantů. Izolanty se dělí do sedmi tepelných tříd, viz Tab. 2.

Izolační materiály, používané při stavbě transformátoru, podléhají po překročení určitých teplot rychlému znehodnocování, čili rychle stárnou. Jako hlavní izolační materiály

se používají různé druhy papíru (papír pro ovíjení, lepenka, bakelitový papír), bavlna, transformátorové oleje a různé druhy laků. Činitelé ovlivňující stárnutí uvedených materiálů jsou: teplota, čas, oxidace, vlhkost. Například krátkodobé přehřátí, i když dosti značné, je pro izolaci méně škodlivé, než přehřátí o několik stupňů nižší, zato však dlouhodobé. Rozhodující vliv má teplota nejteplejšího místa. [1], [5]

Tepelná třída	Dovolená trvalá teplota	Izolanty
0	90°C	papír, bavlna, hedvábí, olejoprskyřice
A	105°C	papír, bavlna, hedvábí impregnované prskyřicemi či v oleji
E	120°C	fenolové prskyřice, alkydy
B	130°C	slída, polyestery
F	155°C	epoxypolyestery, silikon, slída, sklo
H	180°C	epoxypolyamidy, silikon, slída, sklo
C	220°C	porcelán, slída, sklo, silikáty

Tab. 2 – Dělení tepelných tříd a materiály používané jako izolanty.

Podmínky chlazení a materiál izolace určují velikost jmenovitého proudu zařízení. Jmenovitý proud definujeme jako proud, který může elektrickým zařízením trvale procházet, aniž by oteplení kterékoli části elektrického zařízení překročilo dovolenou velikost. [5]

3.9 Principy chlazení

Těleso, které má svou teplotu vyšší oproti teplotě okolí, předává své teplo do okolí. Jedná se o přirozené chlazení teplých těles vzduchem. Předávání tepla z povrchu tělesa do okolí probíhá obecně sáláním, vedením a prouděním. Ovšem sálání většina kapalin nepropouští. Proto se předávání tepla mezi povrchem tělesa a kapalinou uskutečňuje jen vedením a prouděním. Vedení a proudění je v tekutinách – plynech a kapalinách – neoddělitelně vázáno. Vedením se ohřívá vrstvička média, která přiléhá k povrchu tělesa, které teplo předává. Tekutina má těsně u povrchu stejnou teplotu jako těleso. Ohřátím se však objem média zvětší, jeho hustota se zmenší. Rozdíl tíhy studeného a teplého prostředí vyvolá vztlak, který – podle Archimédova zákona – působí na ohřátý objem směrem proti zemské tíži. Ohřáté prostředí se začne pohybovat vzhůru a na jeho místo přitéká studené prostředí. Děj se opakuje. Tekutina v sousedství teplejších stěn začíná proudit a k ochlazovanému povrchu přitéká stále další množství chladného prostředí. Proudění zintenzivňuje odvod tepla z povrchu tělesa.

Jevy vedení a proudění nelze v tekutinách od sebe oddělit, je nutné je uvažovat společně. Protože vliv proudění převažuje nad vedením tepla, situace se názvoslovně zjednodušuje a hovoří se jen o proudění. U přístrojů se setkáváme povětšinou s přirozeným prouděním, které je vyvoláno výše popsaným vztakovým jevem. Nucené proudění není tak časté. Proudění chladící tekutiny je vyvoláno rotačním nebo pístovým kompresorem.

Společné působení sálání, vedení a proudění způsobuje, že přenášené teplo již není přímo úměrné rozdílu teplot jako u pevných těles. Výpočtové vztahy jsou složitější,

avšak pokud jde o přestup tepla při malém rozdílu teplot, můžeme si pro výpočet tepla součinitele přestupu tepla vystačit se zjednodušenými, často linearizovanými vztahy. [5]

3.10 Souhrnná chladivost povrchu

Při odvodu tepla z povrchu tělesa do ovzduší nelze oddělit proudění od sálání. Oba jevy vždy působí současně. Proto musíme při výpočtech oteplení tyto dvě složky slučovat ve výsledný součinitel přestupu tepla z povrchu tělesa. Tyto dvě složky můžeme přímo sečíst jen v případě stejných chladících povrchů. Je-li chladící povrch pro sálání A_s menší než účinný povrch pro proudění A_k , celkový součinitel přestupu tepla α_0 se tak zpravidla vztahuje k povrchu chlazenému prouděním A_k . Proto píšeme vztah

$$\alpha_0 A_k \Delta \vartheta = (\alpha_k A_k + k_s \alpha_s A_s) \cdot \Delta \vartheta, \quad (28)$$

odkud

$$\alpha_0 = \alpha_k + k_s \frac{A_s}{A_k \alpha_s} = \alpha_k + N \cdot \alpha_s. \quad (29)$$

Vztah $N \leq 1$ vyjadřuje souhrnný opravný činitel chlazení sáláním vlivem okolních stínících těles a vlivem případné konkávnosti povrchu. [5]

3.11 Proudění v omezeném prostoru

Velký vliv na tepelný odpor uzavřených povrchů má proudění prostředí. Postupuje-li tepelný tok skrze tekutinovou mezivrstvu směrem k rozhraní mezi konstrukcí a ovzduším, určujeme oběhem zlepšenou vodivost prostředí, $\lambda_{ek} = \varepsilon_k \lambda$. Pro činitele zlepšení ε_k součinitele tepelné vodivosti λ vyplynul z řady měření rozličných útvarů naplněných různými kapalinami a plyny vztah

$$\varepsilon_k = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (30)$$

Je-li $(Gr \cdot Pr) < 10^3$, je $\varepsilon_k = 1$. Charakteristickým rozměrem v Grashoffově čísle je přitom šířka kanálu δ mezi stěnami s rozdílnou teplotou: $\delta \equiv h$. Parametry tekutin se dosazují pro střední hodnotu $\vartheta_{av} = 0,5(\vartheta_1 + \vartheta_2)$, kde ϑ_1 a ϑ_2 jsou teploty protilehlých stěn kanálu ve směru tepelného toku. Vztah pro ekvivalentní tepelnou vodivost je

$$\lambda_{ek} = \varepsilon_k \lambda = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,18 \cdot \left(\frac{g \beta \eta c}{\nu^2 \lambda} \right)^{0,25} \cdot \Delta \vartheta^{0,25} \cdot \delta^{0,75}, \quad (31)$$

zjednodušený tvar rovnice (31) je pak

$$\lambda_{ek} = C_\varepsilon \delta^{0,75} \cdot \Delta \vartheta^{0,25} = C_\varepsilon \cdot \delta^{0,75} (\vartheta_1 - \vartheta_2)^{0,25}.$$

Veličina C_ϵ je tekutinová konstanta pro danou teplotu ϑ_{av} . V Tab. 3 jsou uvedeny součinitele tepelné vodivosti λ a tekutinové konstanty C_ϵ pro vzduch a transformátorový olej.

Tekutina	ϑ_{av} (°C)	10	20	30	40	50	60	70	80
Suchý vzduch 0,1 Mpa	λ (W/m.K)	0,0250	0,0258	0,0265	0,0273	0,0280	0,0288	0,0295	0,0302
	C_ϵ	0,475	0,470	0,465	0,461	0,457	0,453	0,449	0,445
Transformátorový olej	λ (W/m.K)	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,122	0,121	0,120
	C_ϵ	6,65	7,46	8,11	8,88	9,57	10,33	10,89	11,53

Tab. 3 – Součinitel tepelné vodivosti a tekutinová konstanta vzduchu transformátorového oleje. [5]

V případě vodiče s plynovou, nejčastěji vzduchovou, izolační mezerou se dále zlepšuje vodivost prostředí o vliv sálání. Aby se výpočet výsledné vodivosti zjednodušil, volí se za základní způsob přenosu tepla konvekce. Dále se definuje efektivní součinitel vodivosti λ_{ef} , kterým se převádí sálání na vedení. Výpočtové vzorce se odvozují podle geometrického tvaru prostoru – rovinná nebo válcová vrstva. [5]

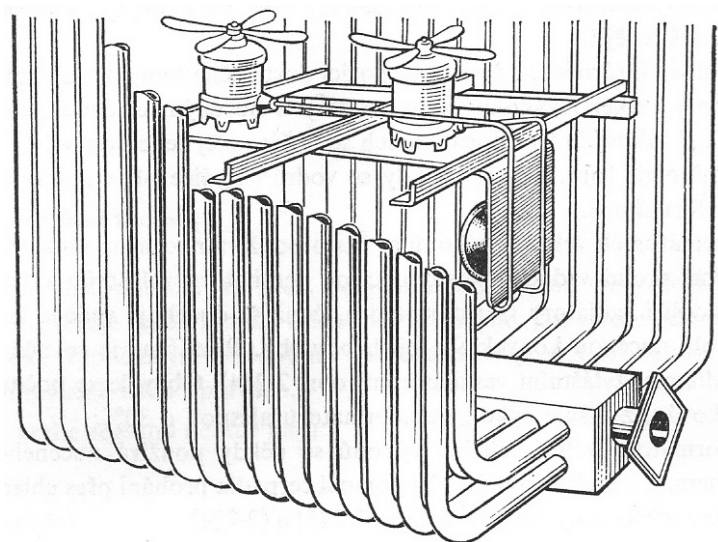
3.12 Způsoby chlazení transformátoru

Všechno teplo, které se v transformátoru vytvoří, musí být odvedeno do okolí. Mechanismus odvodu tepla je následující: Teplo, vzniklé ve vinutích nebo v magnetickém obvodu, se dostává na povrch těchto částí, odkud je – podle způsobu chlazení – buď rozvedeno přímo do okolí (chlazení vzduchem), nebo odváděno olejem (chlazení oleji) a jeho prouděním je předáváno buď stěnám nádoby, nebo stěnám chladiče. Z těchto ploch je pak teplo odváděno do okolí nebo proudem chladicí vody – vodní chladiče. Teplo se do okolí rozvádí konvekcí a sáláním. [1]

3.13 Chlazení s umělým ofukováním

Předávání tepla do okolí za pomoci radiátorů se uskutečňuje zejména konvekcí. Za pomoci umělého zvětšování rychlosti vzduchu proudícího kolem povrchu radiátorů můžeme předávání tepla značně zmenšit. Existují dva způsoby řešení:

- použití jednoho nebo dvou větších ventilátorů, kterými je vzduch přiváděn k radiátorům soustavou trubek,
- použití většího počtu malých ventilátorů, z nichž každý ofukuje 2 až 4 radiátory, viz Obr. 22.



Obr. 22 – Umístění ventilátorů pro ofukování radiátorů. [2]

Při použití jednoho nebo dvou větších ventilátorů je výhodou větší účinnost motorů pohánějící ventilátory. Nevýhodou jsou ale větší hydraulické odpory ve vzduchovém potrubí.

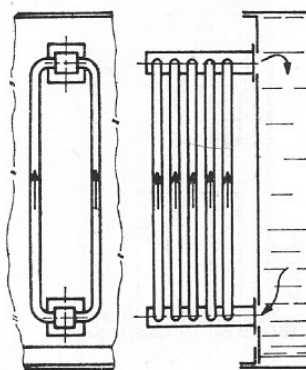
Větší počet malých ventilátorů umožňuje přizpůsobit počet aktivních ventilátorů množství tepla, které je při daném zatížení třeba odvést. [1]

3.14 Chlazení s nuceným oběhem oleje a oddělených chladičem

Radiátory upevněné na nádobě zabírají poměrně mnoho místa, viz Obr. 23, 24. Proto se chladič umísťuje odděleně a používá se nucený oběh oleje, viz Obr. 25. K průtoku oleje se používají odstředivá čerpadla, nazývaná oběhová čerpadla. Oběhovým chlazením se uvnitř transformátoru dosáhne mnohem vyrovnanější teploty oleje, než je tomu u přirozeného chlazení a chlazení s umělým ofukováním. Velkou výhodou je, že se snižuje maximální teplota vinutí.



Obr. 23 – Stěna nádoby s trubicami pro chlazení oleje. [2]



Obr. 24 – Chladičí radiátory. [2]

Výkon oběhového čerpadla závisí na dovoleném teplotním spádu oleje podél chladiče ϑ_{p1} a dále na hodnotě odváděných ztrát. Obvykle se pro chladiče při oběhovém chlazení uvažuje $\vartheta_{p1} = 5$ až 15°C .

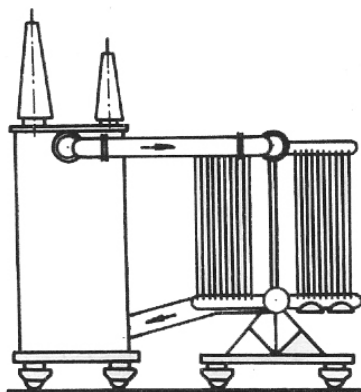
Ztráty odvedené chladičem a množství protékaného oleje je dáno vztahem:

$$\Delta P = v_{o1} \cdot c_{o1} \cdot v_{o1} \cdot \vartheta_{o1}, \quad (32)$$

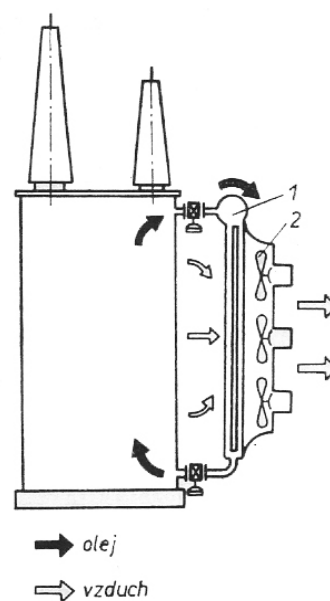
kde: ΔP – ztráty [W],
 c_{o1} – měrné teplo transformátorového oleje,
 v_{o1} – hustota oleje [kg/m^3],
 ϑ_{o1} – požadovaný teplotní spád oleje [$^\circ\text{C}$],
 v_{o1} – průtok olejového čerpadla [m^3/s].

V praxi jsou chladiče obvykle charakterizovány množstvím oleje protlačeného chladiči během 1 minuty, připadajícího na 1 kW ztrát (při požadovaném teplotním spádu ϑ_{o1}).

Olejové chladiče jsou chlazený vodou nebo vzduchem. Pokud jsou chlazený vzduchem, může se jednat o chlazení s ofukováním nebo o přirozené chlazení, viz Obr. 26. [1]



Obr. 25 – Schéma přirozeného chlazení s oddělenou baterií radiátorů. [1]



Obr. 26 – Schéma typického řešení chlazení s nuceným oběhem oleje a s ofukováním, kde 1 – olejové čerpadlo 2 – ventilátory. [4]

3.15 Porovnání systémů chlazení

Nejjistějším a v provozu nejjednodušším je přirozené chlazení. Všechny normální olejové transformátory do výkonu 10 MVA mají obvykle přirozené chlazení. V ojedinělých případech se s přirozeným chlazením můžeme setkat i u transformátorů větších výkonů. V tomto případě se používá oddělená baterie radiátorů, viz Obr. 19.

Horní hranice výkonu transformátoru s chlazením s ofukováním ventilací se pohybuje okolo 75 MVA. V ojedinělých případech se s ní můžeme setkat také u transformátorů větších výkonů. Výhodou toho chlazení je možnost chodu s vypnutými ventilátory, avšak s příslušně sníženým výkonem. Toto nelze provést u transformátorů s vodním chlazením.

Při určitých řešeních chlazení se považuje chlazení ofukováním za pomocný prostředek. Ventilátory jsou spouštěny jen při nevýhodných pracovních podmínkách, jako jsou např. přetížení, vysoká teplota okolí, velké oslunění aj. Chlazení s ofukováním se zásadně vyžaduje u velkých transformátorů postavených na otevřeném prostranství.

Nevýhodou většiny transformátorů s chlazením s nuceným oběhem je, že při poruše zařízení, např. olejového oběhového čerpadla, vodního čerpadla nebo ventilátoru, není transformátor schopen odvést ani ztráty naprázdno bez překročení dovoleného oteplení oleje. A proto se občas využívá náhradního chladičového zařízení, aby při poškození některé z částí jednoho zařízení bylo možno okamžitě spustit druhé. Tím se ovšem zvyšuje cena transformátoru. U tohoto druhu chlazení se obvykle dovoluje vyšší oteplení vinutí než oleje, což umožňuje zvětšit dovolenou proudovou hustotu, a tím zmenšit rozměry transformátoru. Transformátor je tak lehčí, levnější a zabírá méně místa. Provoz je však finančně nejnákladnější.

Vodní chlazení se využívá u velkých elektrárenských transformátorů, kde nejsou problémy se získáním vody. V našem klimatickém podnebí se doporučuje umístit vodní instalaci – čerpadla a chladiče – do uzavřených prostředí, z důvodu možnosti zamrznutí vody v zimním období, je-li transformátor na určitou dobu odstaven.

Jako nedostatky vodního chlazení se považují potíže s utěsněním, koroze, znečištění vody a možnost zamrznutí vody v potrubí i chladiči.

Vzduchové chladiče s ofukováním, u nuceného oběhu oleje, jsou obecně využívány u velkých venkovních transformátorů, např. velkých síťových transformátorů.

Značnou výhodou chlazení s nuceným oběhem oleje je nižší teplota oleje a tím i vinutí, což má za následek také zvýšení životnosti transformátoru. [1]

4. Numerické modelování

Tradičním postupem konstrukce bylo vždy vytvoření prototypu zařízení a s ním i několika verzí základních prvků. Postupným zkoušením jednotlivých prvků se došlo k výsledkům a výběru neoptimálnější varianty. Takovýto postup při výrobě nového zařízení nebo prvku je velice zdoluhavý, finančně náročný, je omezen technologickými možnostmi výroby a parametry daného zařízení.

Z hlediska optimalizace zařízení je velmi důležitá znalost proudění. Proto se v dnešní době stále více využívají moderní numerické metody. S použitím metody konečných prvků (MKP, anglicky FEM) lze provádět výpočty deformací, pro zjišťování proudových polí se uplatňuje metoda konečných objemů CFD. Díky těmto metodám odpadá pracná a nákladná výroba jednotlivých experimentálních prvků a zařízení a tyto metody tak značně zjednodušují, urychlují a zlevňují procesy návrhu, vývoje a konstrukce.

4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vznikla z potřeby řešení komplexních úloh statické mechaniky ve stavebnictví a leteckém inženýrství. První zmínky o metodě konečných prvků je možné vysledovat až do 40. let 20. století, kdy se o ní ve svých pracích zmiňují stavební inženýr Alexander Hrennikoff a matematik Richard Courant.

MKP spočívá v rozšiřování spojitě oblasti do množiny samostatných podoblastí. Oblast je možné rozdělit za pomoci mřížky nebo konečným počtem trojúhelníkových podoblastí pro řešení eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého stupně.

Vývoj MKP se rozběhl v 50. letech 20. století. Hlavní podíl na rozvoji MKP mělo v 60. letech středisko v Berkeley, zaměřené na úlohy stavebního inženýrství. V roce 1973 byla metoda rozpracována proslulým americkým matematikem Gilbertem Strangem. Ve své práci zobecnil MKP do oboru Aplikované matematiky pro numerické řešení fyzikálních soustav pro celou řadu inženýrských oborů – elektromagnetismus, dynamiku tekutin a další.

MKP je ve statické mechanice založena především na energetickém přístupu, např. minimum celkové potenciální energie, jenž poskytuje fyzikální základ se zásadním dopadem na stavební inženýrství. Z pohledu matematiky se MKP používá k nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic (PDR) a také integrálních rovnic, např. pro rovnice vedení tepla.

Metoda konečných prvků je ideální pro řešení PDR na složitých oblastech, jakými mohou být automobily, rozvody potrubí, elektrotechnické prvky aj. [12]

4.2 Ansys Workbench, CFD

Ansys Workbench je moderní výpočetní prostředí. Je v něm integrována řada programů Ansys pro MKP (FEM) výpočty pevnosti, dynamiky, teplotních polí, elektromagnetismu, akustiky a také pro CFD analýzy proudění a jejich interakci. Obsahuje pre a post procesory pro jednotlivé typy analýz a umožňuje výměnu dat mezi programy pro modelování multifyzikálních problémů.

Výpočetní technologie CFD (Computational Fluid Dynamic) využívá matematiku s výpočetní technikou a umožňuje řešit dynamiku proudění částic. Pomocí CFD lze vytvářet výpočetní modely, kterými jsou obecné systémy nebo zařízení. Aplikací fyziky mechaniky tekutin na virtuální model je možno s využitím výpočetní techniky předpovídat chování tekutin se všemi zákonitostmi. Lze tedy simulovat proudění kapalin nebo plynů, přenos teploty nebo hmoty, interakci mezi pevnou a vzdušnou částí řešené úlohy pomocí strukturální analýzy a mechanického vlnění. Vytvořený virtuální model lze považovat za prototyp systému či procesu a je možné jej sledovat v reálném čase a analyzovat jeho chování na různé podněty. Z datových a grafických výstupů je uživatel schopen analyzovat chování namodelované soustavy. [11]

4.3 Ansys CFX

Jedná se o pružný a výkonný nástroj pro řešení problémů spojených s CFD. Je navržen pro řešení inženýrských problémů ve všech oblastech průmyslu. Program Ansys CFX dokáže pracovat samostatně, ale rovněž v prostředí Ansys Workbench. Tím umožňuje plné sdílení informací ve všech modulech prostředí Ansys.

Většinu fyzikálních modelů, pro které je program vytvořen, je možné kombinovat pro všechny typy elementů a přes všechny typy vzájemného napojení mřížek.

Řešič programu je implicitní s algebraickým multigridem. Všechny proměnné se počítají v jedné matici, v jednom kroku, čímž se dosahuje velké konvergence u složitých výpočtů, jako jsou například rotační stroje. [10]

4.4 Vytváření modelu

Postup modelování je rozdělen do několika částí, minimálně však do tří:

1. Preprocesor – příprava modelu
2. Solver – výpočet
3. Postprocesor – zobrazení výsledků.

Preprocesor slouží k vytváření modelu. Umožňuje vytvoření geometrického modelu s využitím CAD programů (v našem případě SolidWorks), úpravu geometrie, generování mřížky, zadání numerického modelu – materiál, fyzikální vlastnosti aj.

Solver (řešič) provádí výpočet řešeného problému. Výsledky se po výpočtu uloží do výstupních datových a grafických souborů. Ve většině moderních výpočetních softwarů existuje široká škála možných nastavení:

- vícefázové problémy
- reakce látek
- posun a deformace těles navozené tlakovým zatížením
- turbulentní modely
- radiace, konvekce, kondukce

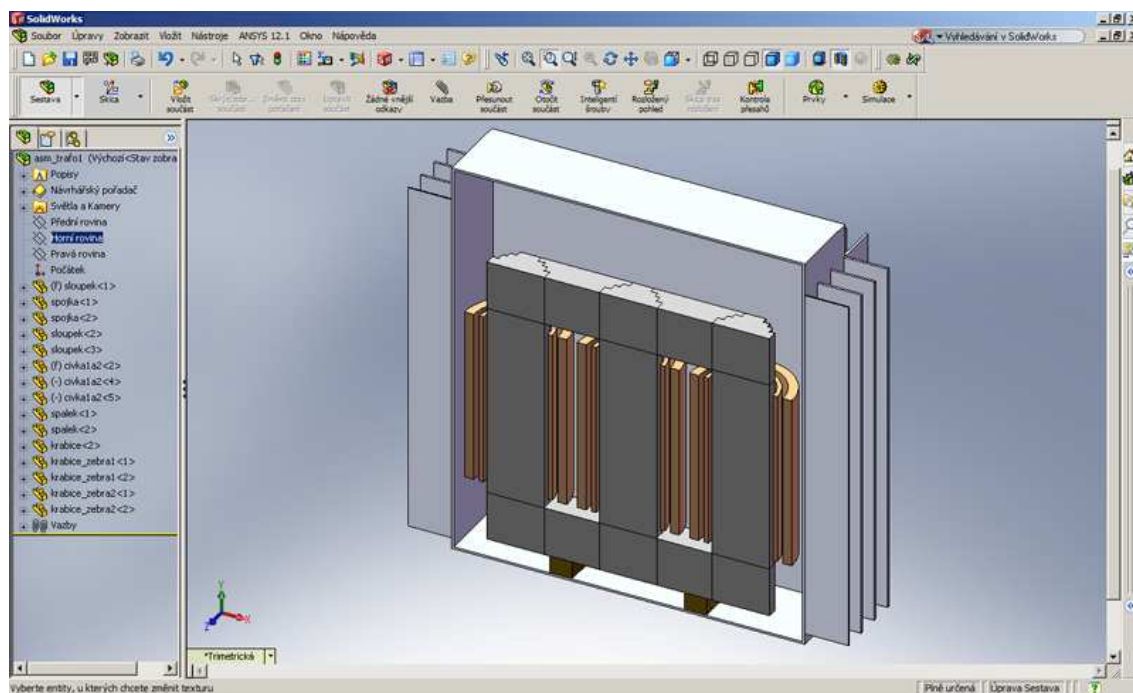
- akustika, šíření mechanického vlnění
- dynamické přesíťování (remesh) podle gradientu vypočtených hodnot.

Postprocessor je posledním prvkem celkové analýzy. Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny ve formě čísel, obrázků, grafů, animací (jen pokud byla úloha řešena v čase) a u většiny komerčních softwarů i ve 3D zobrazeních. [12]

5. SolidWorks

SolidWorks je parametrický objemový modelář postavený na jádře Parasolid a byl od začátku vyvíjen jako aplikace pro operační systém MS Windows tak, aby byly co nejlépe využity možnosti, které Windows nabízejí.

SolidWorks je snadno ovladatelný špičkový 3D systém, který je dnes standardem v 3D modelování a přitom nevyžaduje dlouhou dobu zaškolení, protože ovládáte-li Windows, umíte 1/2 SolidWorks, viz Obr. 27.



Obr. 27 – Pracovní prostředí programu SolidWorks.

SolidWorks přistupuje k uživateli jako ke tvůrci určitého výrobku a usnadňuje mu realizaci jeho myšlenek. Tvorba modelu probíhá ve 3D prostoru, protože konstruktér nebo designér by měl přemýšlet o funkci výrobku, jeho vlastnostech a vzhledu, nikoliv o tom, jak výrobek vypadá v jednotlivých pohledech nebo řezech. Tento problém za uživatele řeší systém.

Kromě obvyklých funkcí výkonného objemového modeláře disponuje i funkcemi pro práci s plochami, práci s plechovými díly, importy a exporty mnoha formátů dat, práci

s rozsáhlými sestavami, automatické generování výkresové dokumentace. SolidWorks se pyšní jedinečným a patentovaným správcem geometrie („Feature Manager“), který umožní uživateli plnou kontrolu nad historií modelování a vlastnostmi jednotlivých operací. Toto vše spolu s nadstavbami pro parametrizaci importovaných dat, vizualizací, animací, tvorbou potrubních systémů, normáliemi pro formy a knihovnami činí ze SolidWorks vynikající CAD řešení pro oblast strojírenství a průmyslového designu.

Jednotlivé díly, sestavy a výkresy jsou uloženy v samostatných souborech propojených vazbami a odkazy. Uživatel při zahájení práce volí, zda bude konstruovat jednotlivý díl, sestavu nebo výkres.

6. Praktická část simulace přirozeného a nuceného chlazení transformátoru

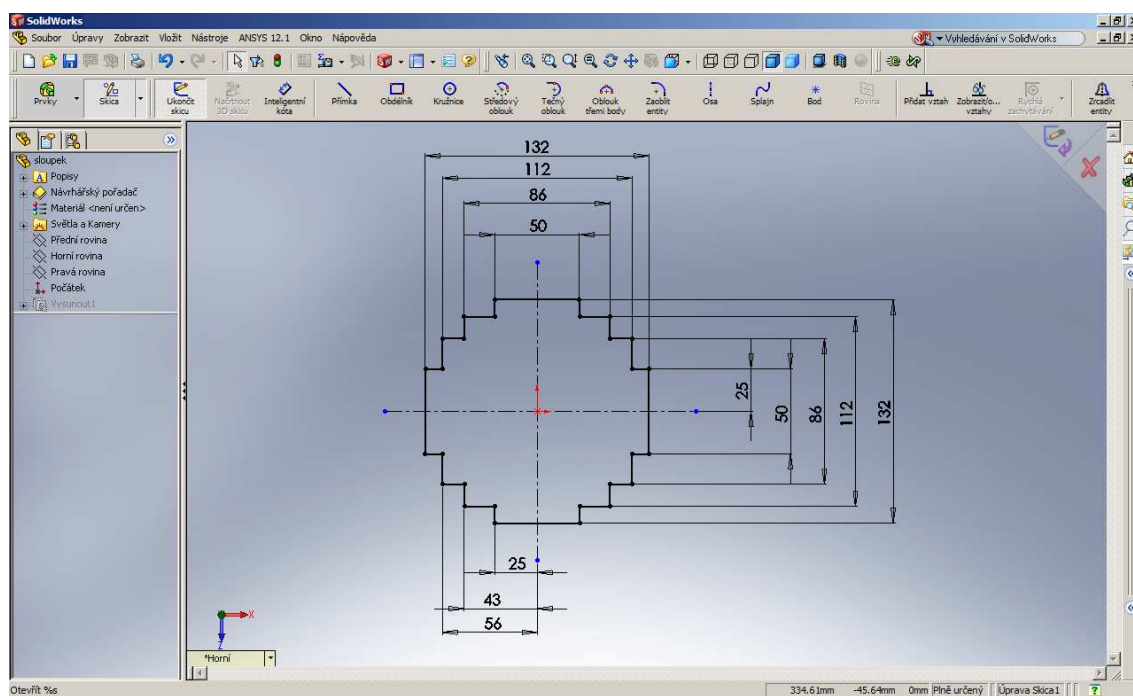
Tato část je zaměřena na simulaci přirozeného a nuceného chlazení transformátoru. Spočívá ve vytvoření dvou numerických modelů transformátorů v CAD programu SolidWorks. Jeden model slouží pro simulaci přirozeného chlazení transformátoru, druhý model pro simulaci nuceného chlazení. Následovat bude importování vytvořených modelů do výpočtového programu Ansys Workbench, ve kterém se provede příprava modelu na simulaci, definování základních podmínek a následně simulace modelů transformátorů. Z dosažených výsledků se následně vyvodí závěry a provede se porovnání s klasickými výpočty.

6.1 Vytvoření numerického modelu transformátoru pro řešení oteplení

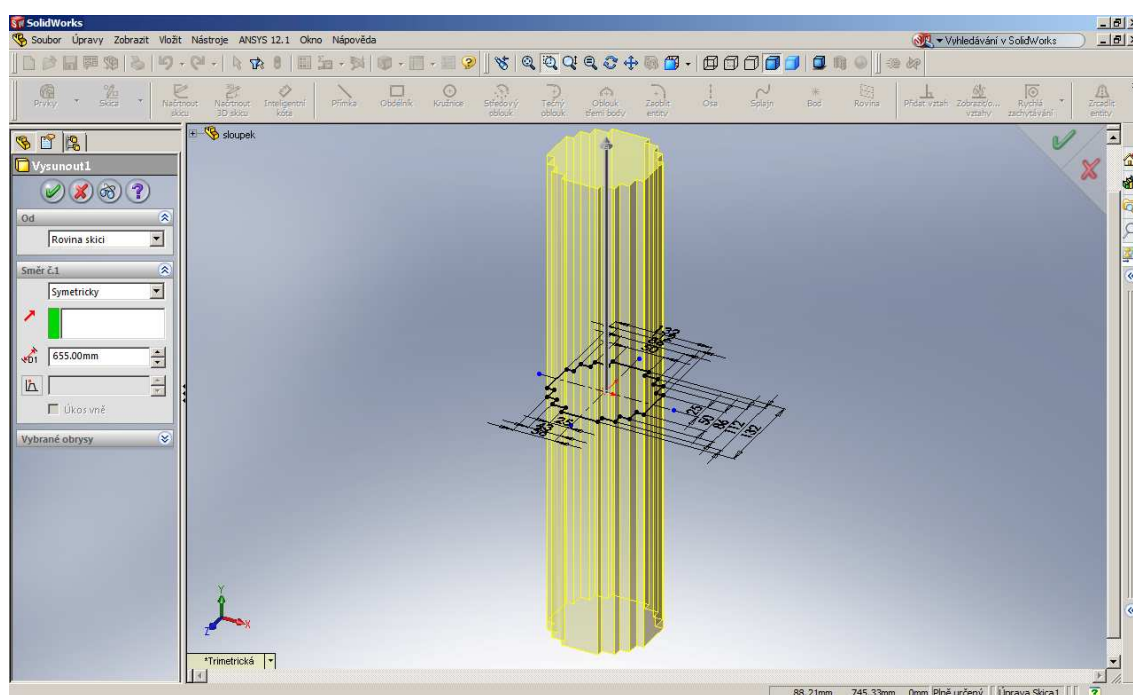
Vzorem pro model transformátoru je příklad návrhu transformátoru v přesném znění z knihy Prof. Ing. Dr. Ladislava Cigánka a Ing. Dr. Miroslava Bauera – Elektrické stroje a přístroje, viz. Příloha I. [8]

K vytvoření numerického modelu transformátoru byl využit CAD software SolidWorks. Postup tvorby numerického modelu byl následující:

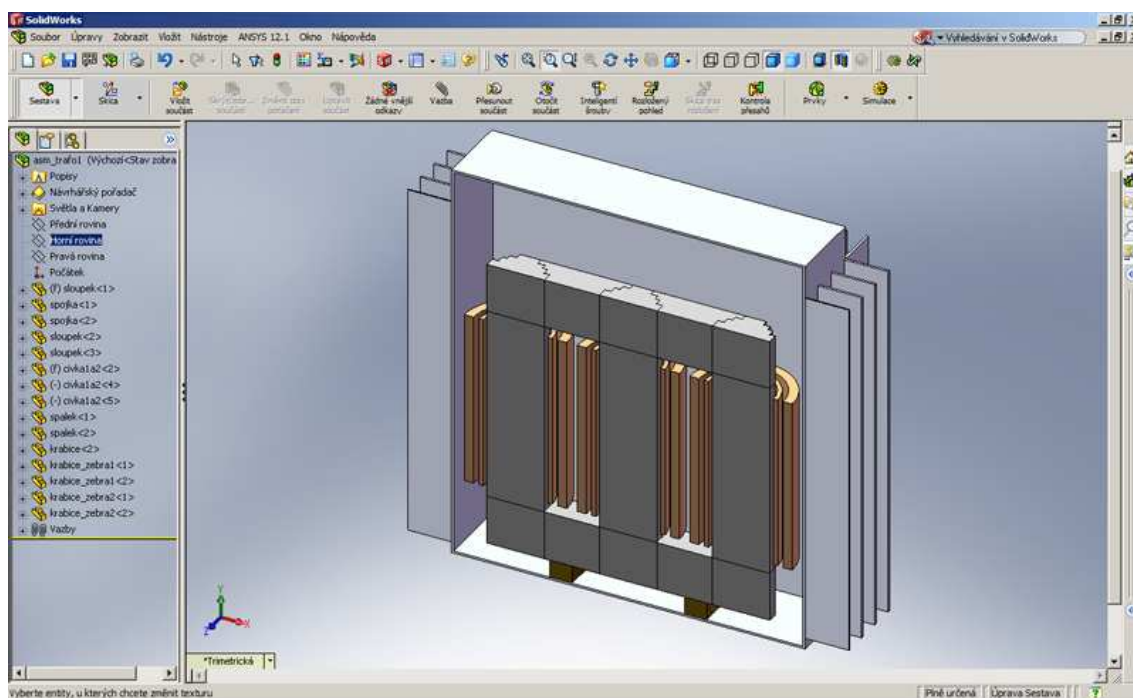
- narysování jednotlivých částí transformátoru – sloupků, spojek, cívek, obalu transformátoru, viz Obr. 28,
- vytvoření 3D modelů jednotlivých částí, viz. Obr. 29,
- vytvoření sestavy transformátoru z jednotlivých částí, viz Obr. 30,
- uložení numerického modelu ve formátu Parasolid pro následný export do výpočtového programu Ansys.



Obr. 28 – Rýsování sloupku transformátoru.



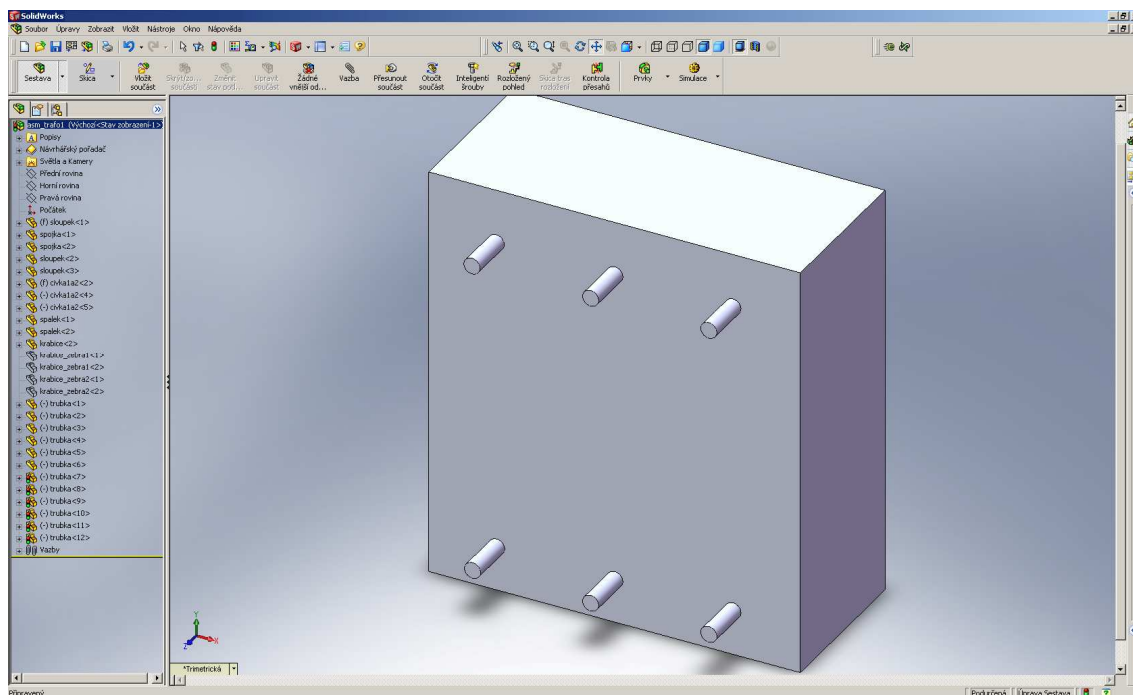
Obr. 29 – Vytvoření 3D modelu sloupku transformátoru.



Obr. 30 – Výsledný model transformátoru s přirozeným chlazením.

Pro následující řešení simulace přirozeného a nuceného chlazení transformátoru bylo zapotřebí upravit model transformátoru. Při dokončování modelu transformátoru v programu SolidWorks bylo zjištěno, že mezi cívkami nn a sloupky transformátoru není dostatečná mezera pro tvorbu výpočetní sítě v programu Ansys. Tato situace by neumožnila řádně simulovat proudění kapaliny mezi cívkami a sloupky transformátoru. Z tohoto důvodu byly zvětšeny průměry obou cívek a vznikla tak dostatečná mezera pro tvorbu výpočetní sítě. Výšky obou cívek byly rovněž upraveny, a to na stejnou výšku. Tato změna rozměrů nebude mít na výsledky simulace výraznější vliv.

Model transformátoru pro řešení nuceného chlazení byl upraven tak, že z nádoby transformátoru pro přirozené chlazení byly odebrány chladicí žebra a místo nich byly na přední a zadní stěnu nádoby dorýsovány trubky pro přívod a odtok transformátorového oleje, viz Obr. 31. Nádoba, ve které se olej chladí i s pomocí ventilátorů rýsována nebyla. Její význam je nepodstatný. Cílem diplomové práce je ukázat, jak je možné simulovat přirozené a nucené chlazení olejového transformátoru a dosažené výsledky porovnat s analytickými výpočty.



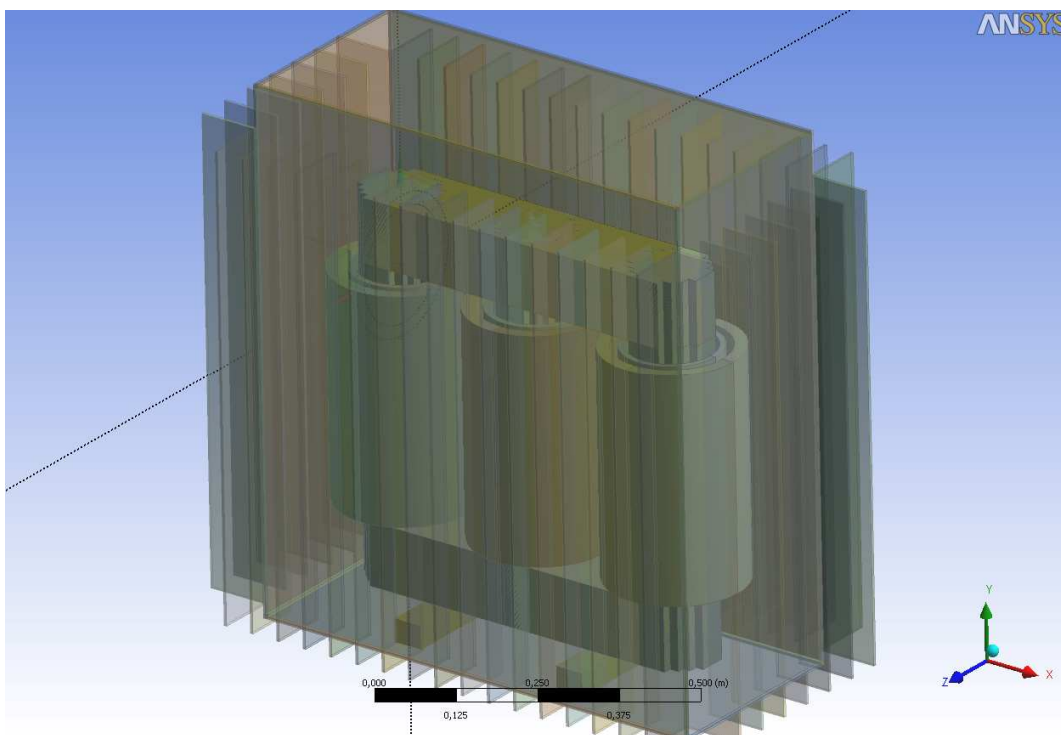
Obr. 31 – Vnější pohled na obal transformátoru s trubicami pro přívod a odtok transformátorového oleje u transformátoru s nuceným chlazením.

6.2 Import modelu transformátoru do výpočtového softwaru

K modelování je využit program Ansys Workbench. Jeho součástí je program *Design Modeler*, který slouží k parametrickému 3D kreslení výpočetní oblasti. Program je postaven na jádře *Parasolid* a umožňuje importovat nakreslené geometrie z různých CAD programů (SolidWorks, Inventor, Pro/Engineer aj.).

Po spuštění programu následují tyto kroky:

- vytvoření nové roviny pro následné importování modelu transformátoru
- import modelu transformátoru vytvořeného v programu SolidWorks, viz Obr. 32,
- sjednocení částí (objemů) transformátoru do skupin (entit) a jejich pojmenování pro jednodušší práci při vybírání ploch,
- definice základních vlastností jednotlivým prvkům, které jsou součástí modelu transformátoru (Solid – pevná část, Fluid - tekutina).



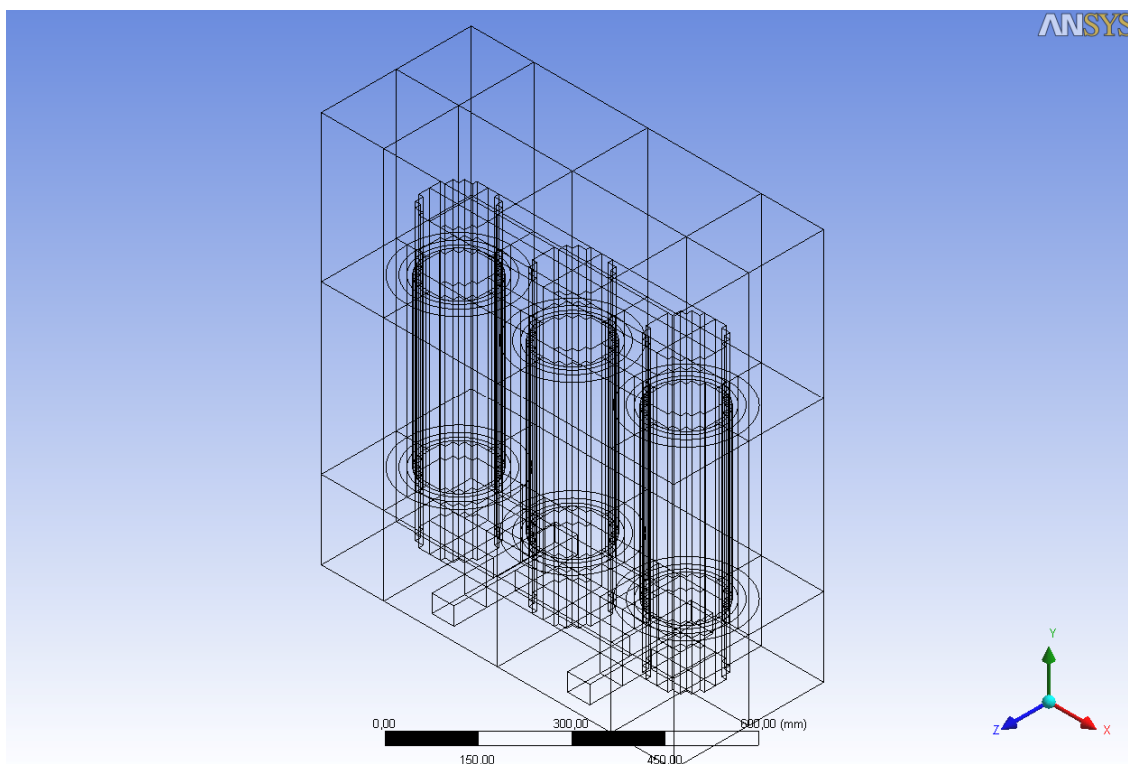
Obr. 32 – Naimportovaný numerický model transformátoru v programu Ansys.

6.3 Tvorba řezů prvků transformátoru a tvorba výpočetní sítě

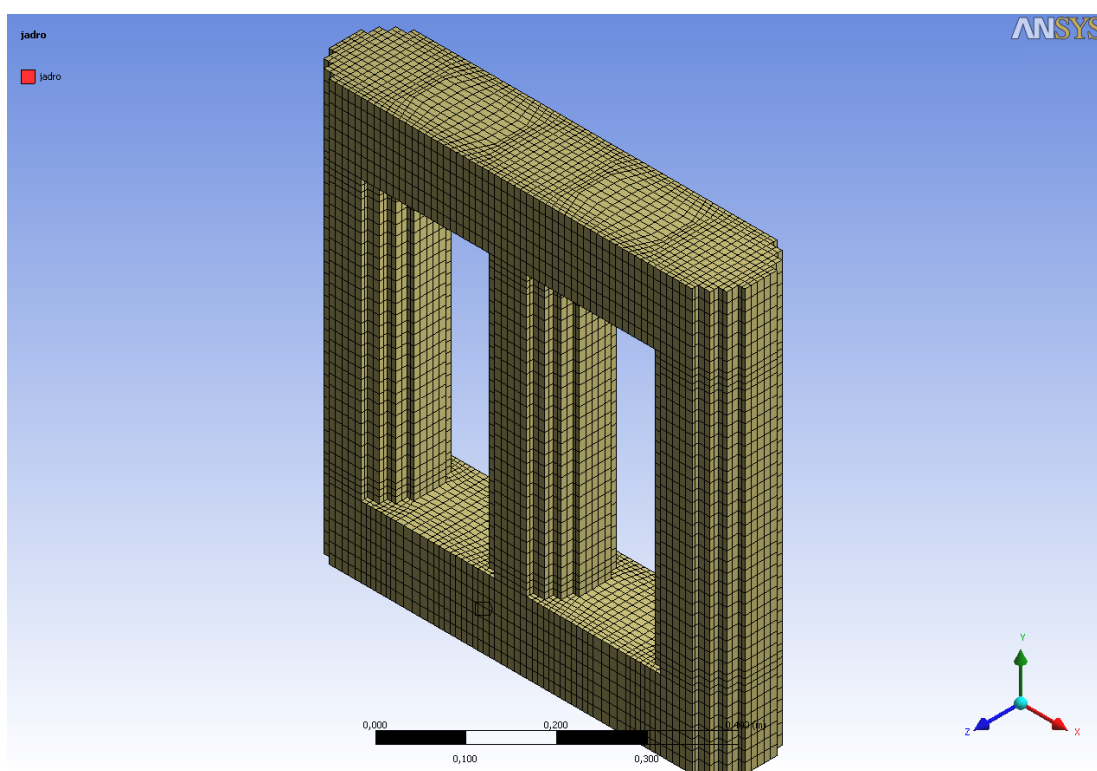
- vytvoření řezů na jednotlivých prvcích transformátoru pro jednodušší tvorbu výpočetní sítě, viz Obr. 33,
- tvorba výpočetní sítě na jednotlivých prvcích, viz Obr. 34 až Obr. 40,
- složení prvků transformátoru do jednoho celku.

Tvorba výpočetní sítě je jedním z nejdůležitějších kroků při přípravě numerického modelu na simulaci. Jemnost sítě (kvalita) ovlivňuje zásadním způsobem výsledky výpočtů. Čím jemnější síť bude, tím budou výsledky výpočtů přesnější, avšak na úkor zvýšení počtů elementů a tím i doby potřebné pro samotný výpočet. Výpočetní síť byla vytvořena v programu Meshing, jenž je součástí programu Ansys Workbench.

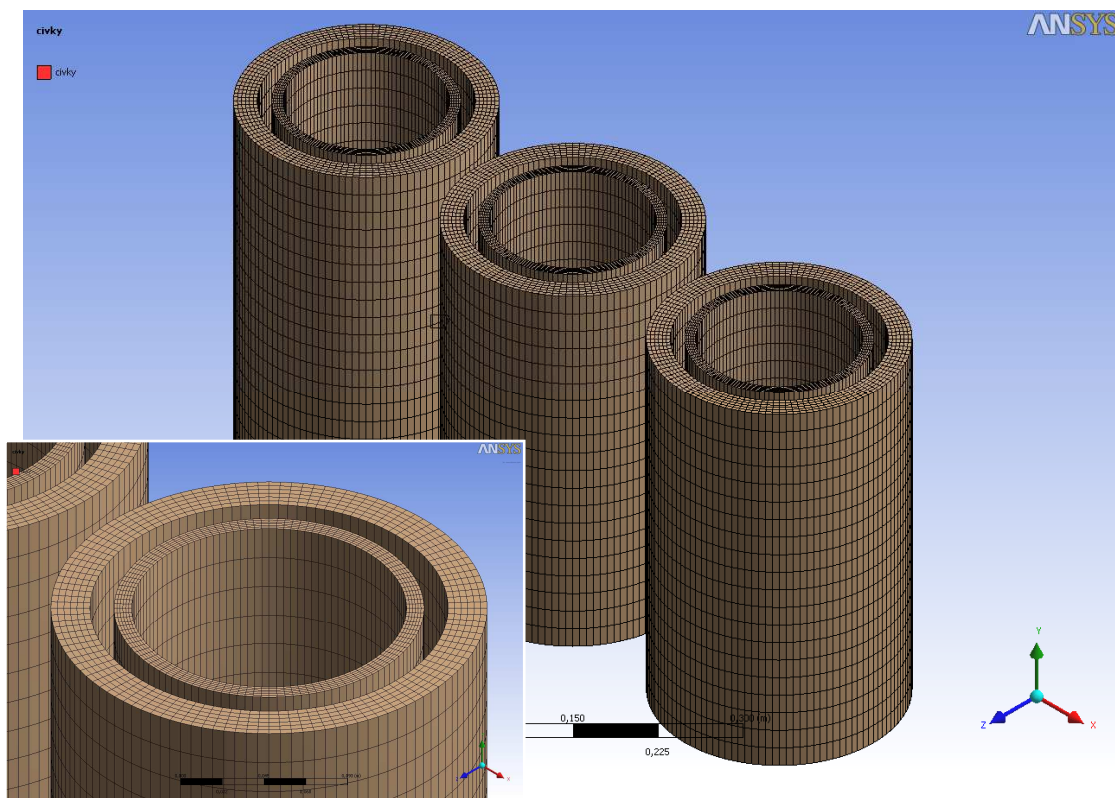
V našem případě bylo nutné zvětšit průřez cívek, viz Kapitola 6.1., abychom dokázali vytvořit minimálně 3 elementy mezi sloupky transformátoru a cívkami nn pro kvalitní simulaci proudění oleje v této části transformátoru. Jelikož byla tato tvorba sítě velice náročná a nedařilo se vytvořit 3 elementy v daném prostoru, bylo zapotřebí objem oleje mezi sloupky a cívkami nn rozdělit (vytvořit řezy objemů) na několik jednotlivých částí. Řezy byly vytvořeny i na ostatních objemech transformátoru, viz Obr. 33.



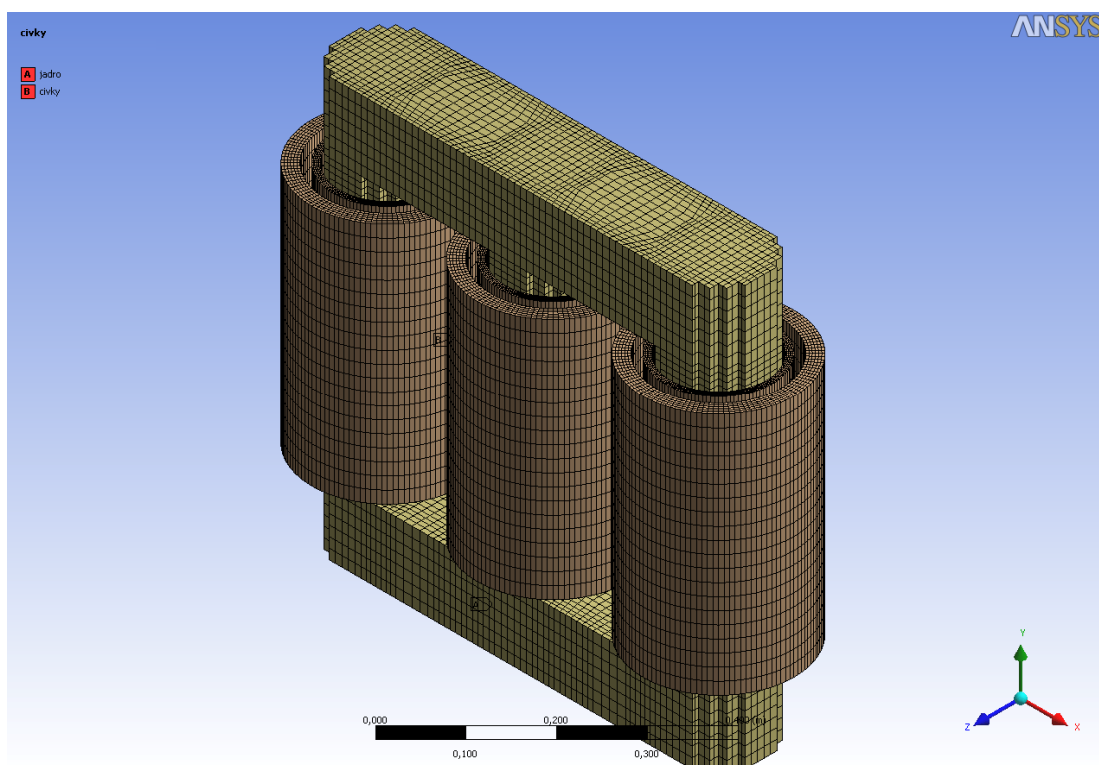
Obr. 33 – Tvorba řezů jednotlivých prvků numerického modelu transformátoru.



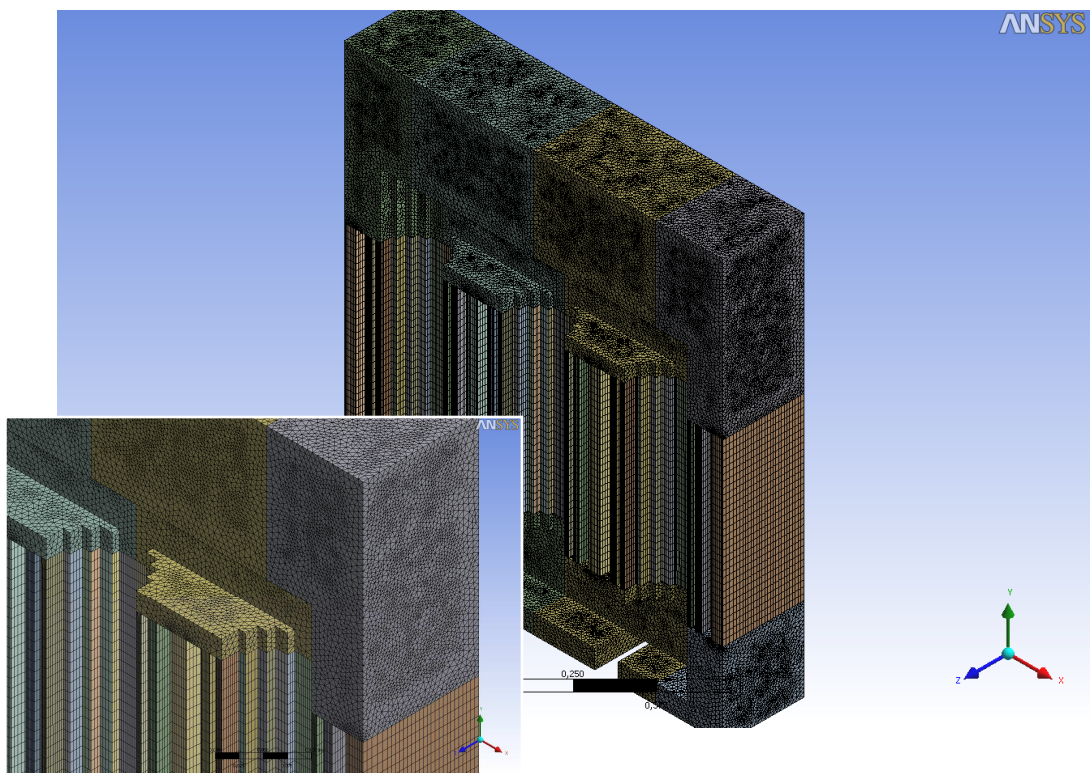
Obr. 34 – Zhotovení výpočetní sítě na jádře transformátoru.



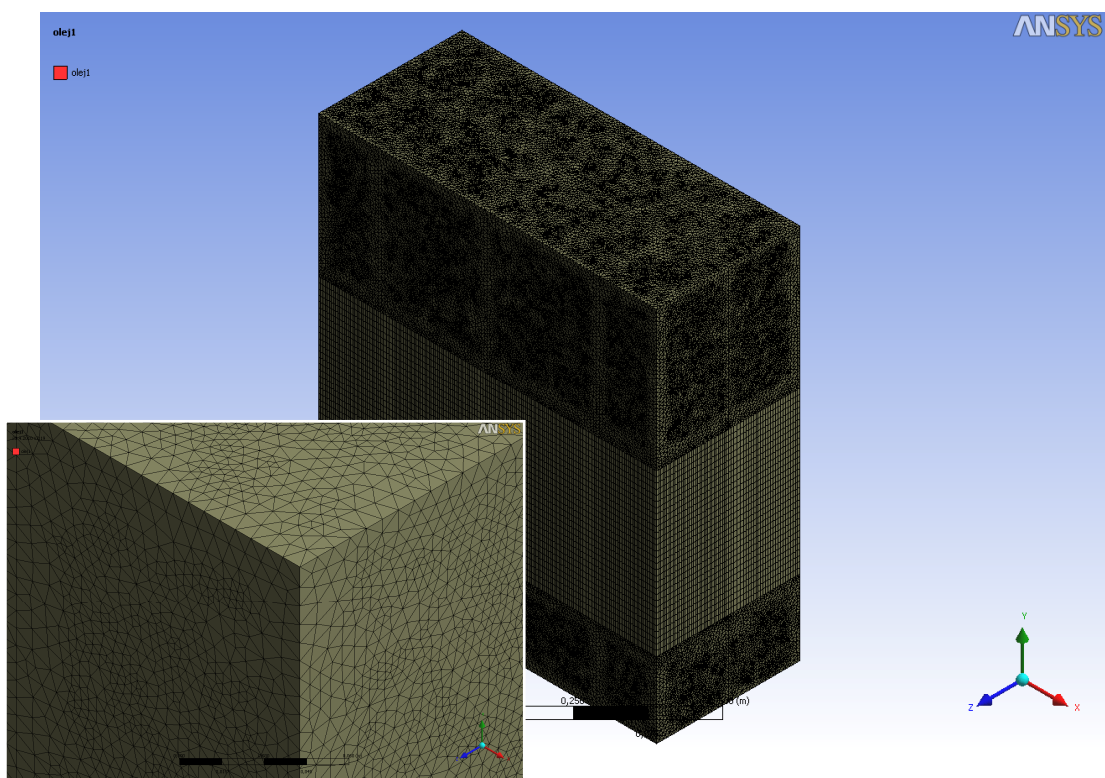
Obr. 35 – Zhotovení výpočetní sítě na cívkách transformátoru.



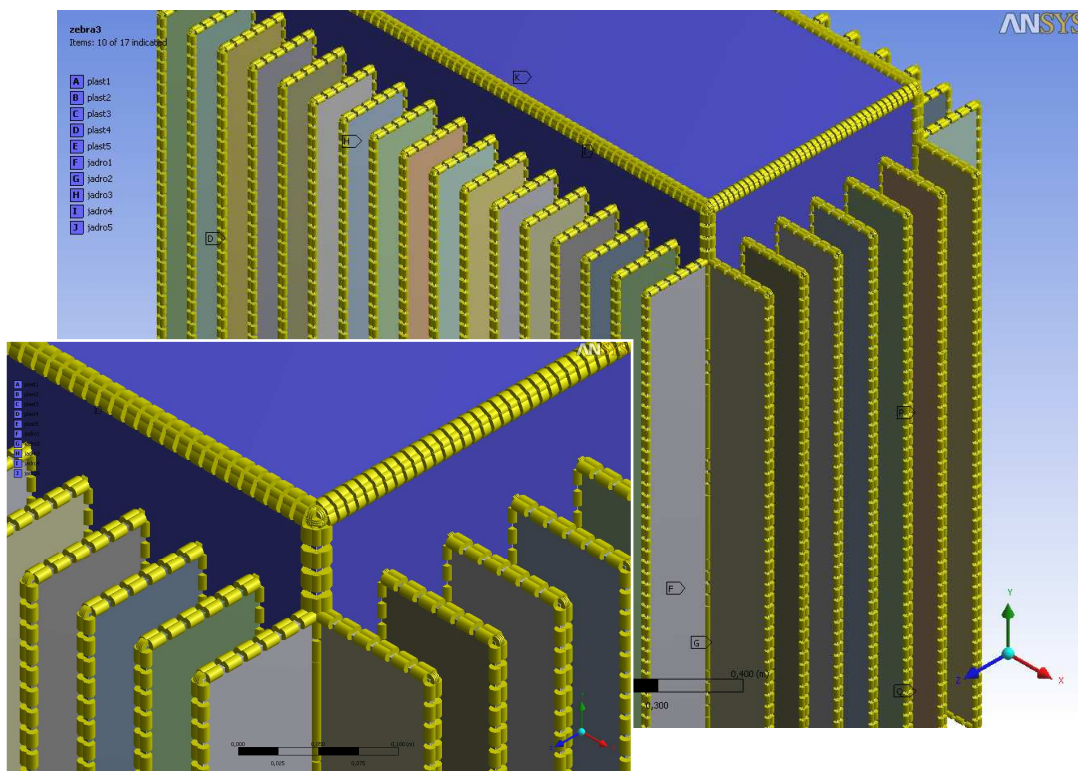
Obr. 36 – Dokončená výpočetní síť na jádře a cívkách transformátoru.



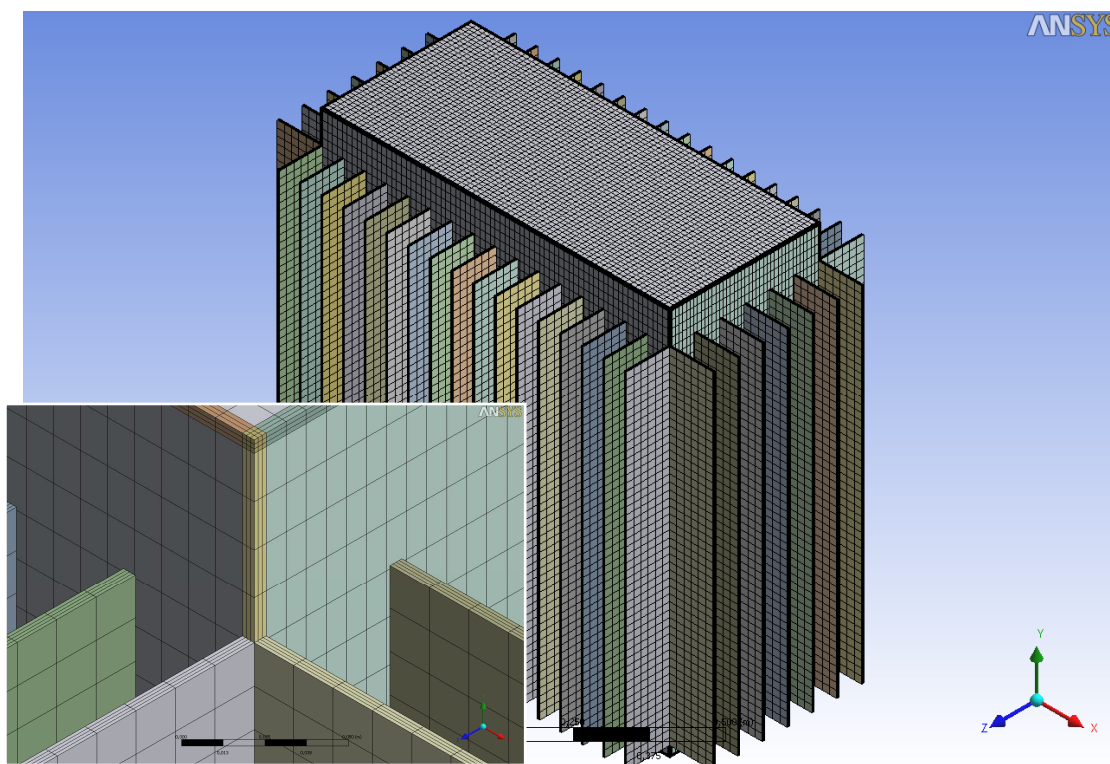
Obr. 37 - Řez a detail výpočetní sítě transformátorového oleje.



Obr. 38 – Zhotovená výpočetní síť transformátorového oleje a její detail.



Obr. 39 – Tvorba výpočetní sítě na plášti a žebrech transformátoru pomocí přesného zvolení počtu elementů na jednotlivých hranách.

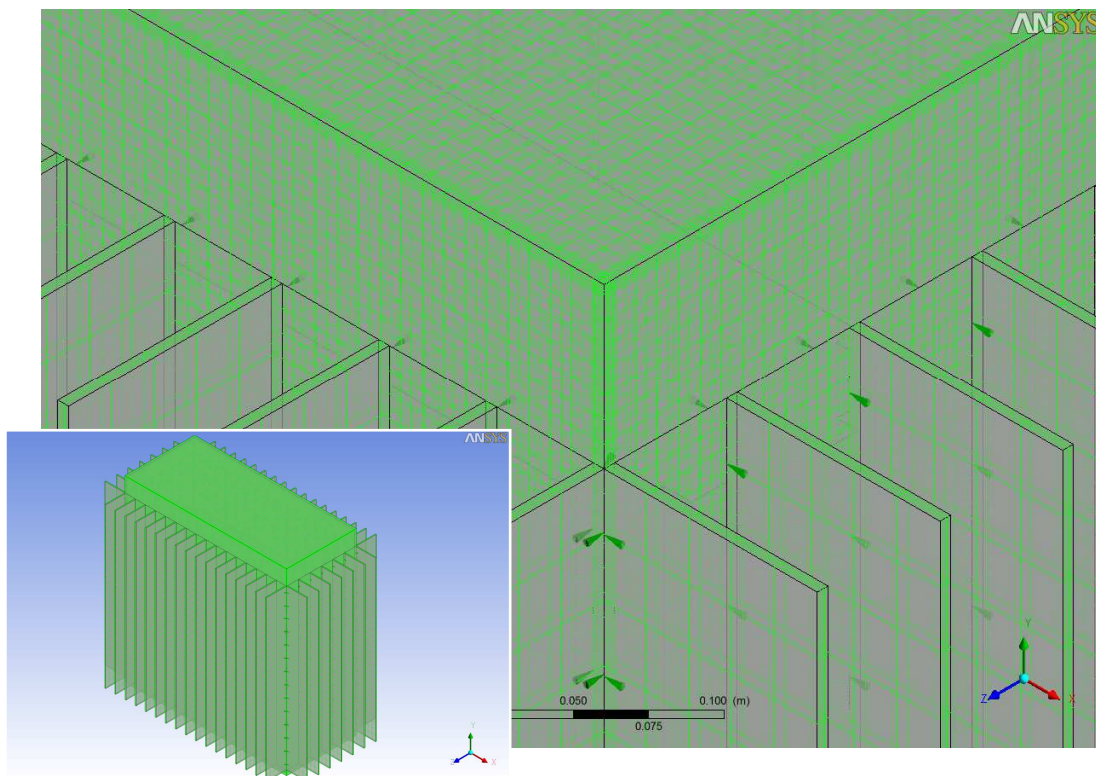


Obr. 40 – Dokončená výpočetní síť na plášti a žebrech transformátoru.

6.4 Načtení výpočetní sítě, definice výpočetní oblasti

Definování řešené úlohy se provádí v preprocesoru Pre-CFX. Po spuštění programu je potřeba vytvořit novou simulaci. Následují tyto kroky:

- načtení výpočetní sítě vytvořené v programu Ansys Workbench, viz Obr. 41,
- vytvoření výpočetních oblastí.



Obr. 41 – Načtená výpočetní síť transformátoru pro přirozené chlazení v preprocesoru Pre-CFX.

6.5 Definice fyzikálních, materiálních vlastností a okrajových podmínek pro simulaci přirozeného chlazení transformátoru

Zprv je nutné říci, že simulace přirozeného a nuceného chlazení transformátoru bude řešena v ustáleném stavu.

Definice základních vlastností (pevná látka, proudící látka, režim proudění, gravitace, teploty, tlak, součinitel přestupu tepla apod.) spočívá v těchto krocích:

- a) definice materiálových vlastností,
- b) definice zatížení,
- c) definice okrajových podmínek.

a) Materiálové vlastnosti

Materiál jádra – ocel (zvoleno z předdefinovaných materiálových vlastností v databázi programu Pre-CFX),

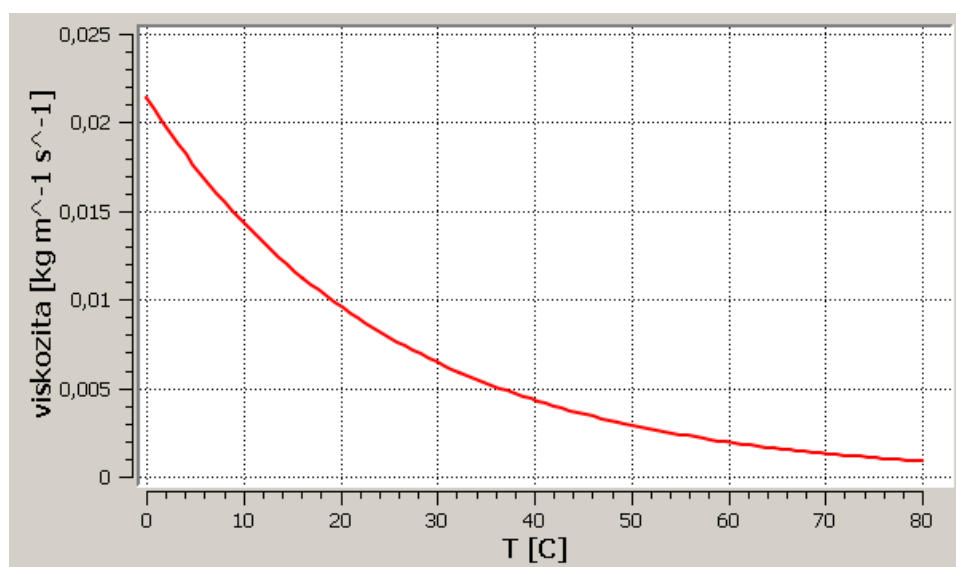
Materiál cívek – měď

Materiál	Hustota	Měrná tepelná kapacita	Referenční teplota	Tepelná vodivost	Tlak	Tepelná roztažnost	Dynamická viskozita
	kg/m ³	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	°C	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	atm	K ⁻¹	Pa.s
Měď	8933	385	25	401			
Ocel	7854	434	25	60,5			
Olej	880	1800	25	0,123	1	0.00075	viz níže
Vzduch	1.185	1004,4	25	0,0261	1	0.003356	0,00001831

Tab. 4 – Přehled materiálových vlastností zadaných v Pre-CFX.

Tepelná roztažnost oleje a vzduchu byla zvolena z matematicko-fyzikálních tabulek. Dynamická viskozita oleje byla do programu nastavena podle vzorce:

$$\nu = 0,00968 \cdot e^{(-0,04 \cdot (T - 293))} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Pa.s}) \quad (33)$$



Graf 4 – Závislost viskozity oleje na teplotě. [Zdroj: Program Pre-CFX]

Viskozita určuje tekutost kapalin. Čím je viskozita oleje nižší, tím je olej tekutější (řidší) a má menší vnitřní odpor proti proudění a toku. Vyšší viskozita oleje znamená hustější olej, který má vyšší odpor a tím i pomalejší tok. Měření se provádí viskozimetrem.

Dále bylo nastaveno gravitační zrychlení na hodnotu $-9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Bylo třeba také zadat referenční teplotu, od které začne řešení úlohy v ustáleném stavu. Referenční teplota byla

nastavena na hodnotu 40°C. V neposlední řadě bylo třeba nastavit referenční tlak. Jeho hodnota byla zvolena na 1 atm (101 325 Pa).

b) Zatížení

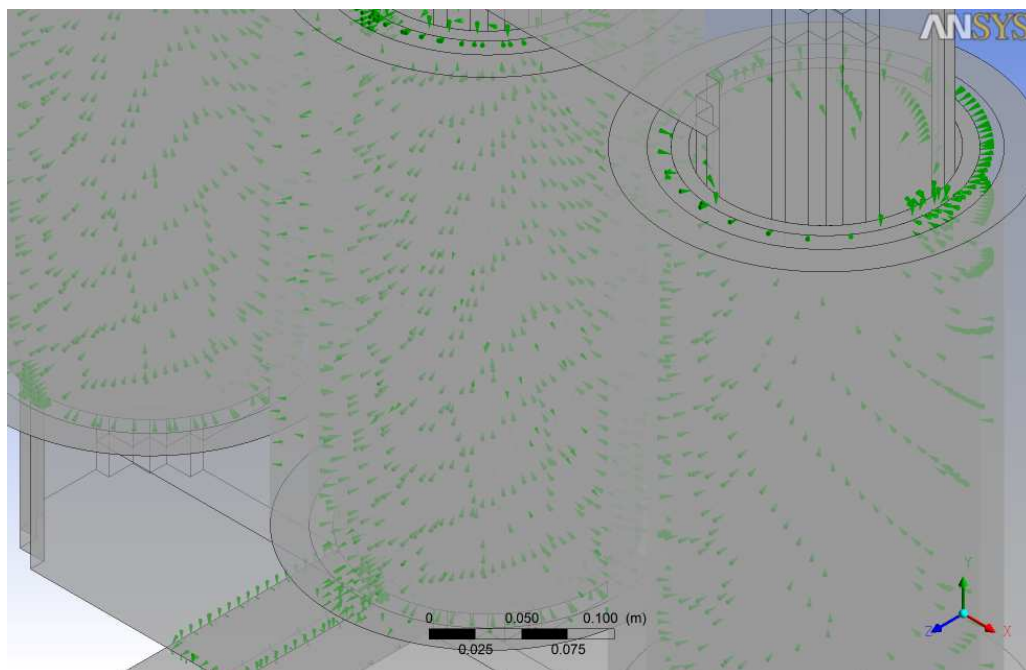
Zatížení se definuje ve formě energie (výkonu) vznikající v daném objemu. Aby bylo možné generovat teplo, musely se zadat ztráty ve všech objemech, čili v cívkách nn, cívkách vn a v jádře. Analytickým výpočtem, viz Příloha 1, vznikly a byly dosaženy tyto ztráty:

$$\begin{aligned} \text{- v cívce nn} \quad Q_1 &= (3 \cdot P_2) / (3 \cdot V_{C_{nn}}) = (3 \cdot 336) / (3 \cdot 0,001765) \doteq 190400 \text{ W} / \text{m}^3 \\ \text{- v cívce vn} \quad Q_2 &= (3 \cdot P_1) / (3 \cdot V_{C_{vn}}) = (3 \cdot 409) / (3 \cdot 0,005357) \doteq 76350 \text{ W} / \text{m}^3 \\ \text{- v jádře} \quad Q_3 &= P_{Fe} / V_{\text{jádra}} = 750 / 0,0361333 \doteq 20800 \text{ W} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

c) Okrajové podmínky

Okrajové podmínky se definují na hranice oblastí (nádob, žebra). To znamená, že je třeba definovat vlastnosti na vnějších stěnách výpočtové oblasti, které jsou obtékané vzduchem. Vyberou se tedy plochy, mezi nimiž (ne)dochází ke změnám teploty. Těmito plochami jsou např.:

- plocha jádro – olej,
- plocha cívka nn – olej,
- plocha cívka vn – olej,
- plocha plášť – žebra a další, viz Obr. 42.



Obr. 42 – Šipky znázorňující definované plochy, na kterých dochází ke změnám teploty.

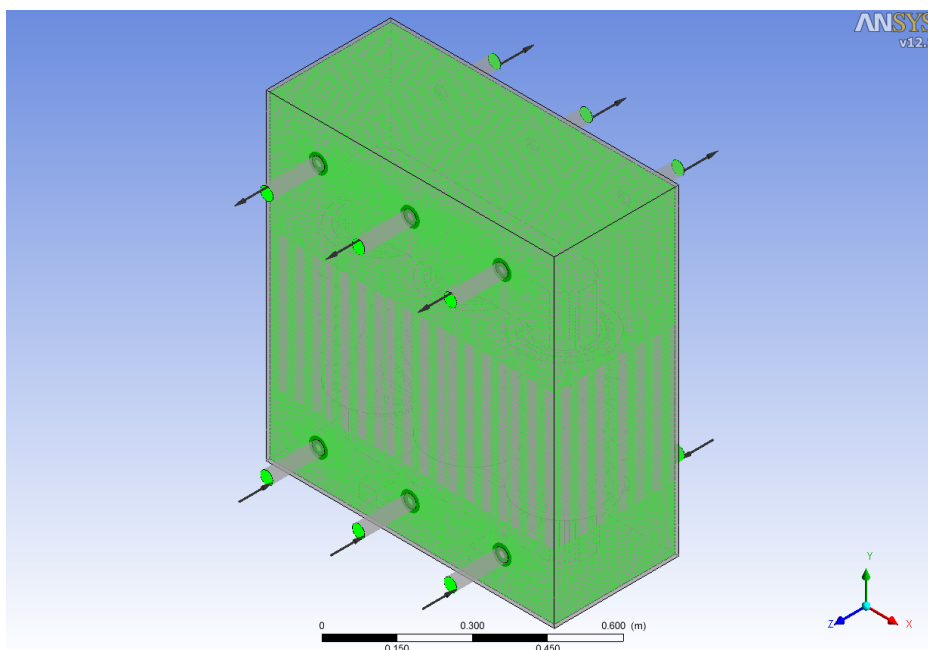
Na dno transformátoru byla zvolena konstantní teplota. Z víka a žeber transformátoru dochází k odvodu tepla do okolí. Důležitým parametrem, který popisuje šíření tepla do okolního prostředí je součinitel přestupu α . Jeho stanovení je však obtížné, závisí na teplotě okolí a jeho hodnota se může pohybovat v širokém rozpětí. Zpravidla se velikost součinitele přestupu tepla volí ze zkušenosti nebo na základě empirických vztahů. [7] Obecně platí, že větší hodnota součinitele přestupu tepla představuje účinnější chlazení, tzn. že teplo přestupuje do okolí snadněji. Empiricky můžeme jeho hodnotu pro vodorovnou rovinnou plochu vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\alpha_{pk} = 2,5 \cdot t^{\frac{1}{4}} \quad (34)$$

Budeme-li uvažovat, že teplota nádoby se může pohybovat v rozmezí 40°C až 70°C, hodnota součinitele přestupu tepla na horním víku může nabývat velikosti α (0 – 6) W/m². Pro jednoduchost řešení byla hodnota součinitele přestupu tepla zvolena o hodnotě $\alpha = 5 \text{ W.m}^2.\text{K}$ a zadána na horní víko transformátoru a plochy žeber.

6.6 Definice fyzikálních, materiálních vlastností a okrajových podmínek pro simulaci nuceného chlazení transformátoru

Všechna fyzikální a materiálová nastavení jsou stejná jako v případě úlohy pro simulaci přirozeného chlazení transformátoru. Rozdíl oproti předchozí úloze spočívá v nutnosti určení vstupů a výstupů, které přivádí a odvádí chladicí kapalinu, viz Obr. 43. Další důležité nastavení spočívá v předepsání vstupní rychlosti chladicího média do obalu transformátoru.



Obr. 43 – Model transformátoru s nuceným oběhem chladicí kapaliny s určenými vstupy a výstupy.

Nastavení pro řešení úlohy nuceného chlazení transformátoru jsou následující:

- spodní trubky na obou stranách pláště transformátoru nastaveny jako vstupy (IN) pro chladicí kapalinu, navíc s okrajovými podmínkami INLET, které určují, že se chladicí kapalina těmito trubkami vrací zpět,
- horní trubky na obou stranách pláště transformátoru nastaveny jako výstupy (OUT) pro chladicí kapalinu, navíc s okrajovými podmínkami OUTLET, které určují, že je chladicí kapalina v oběhu,
- k trubkám byla přidána vlastnost adiabatická, což znamená, že na nich nedochází k přestupu tepla,
- rychlost oleje vháněného do transformátoru 1 m.s^{-1} ,
- přestup tepla – statická teplota 40°C ,
- relativní tlak 0 Pa .

6.7 Inicializace a nastavení řešiče, spuštění výpočtu

Řešené úlohy je třeba inicializovat, tzn. definovat počáteční podmínky, které jsou potřebné pro spuštění úloh. Inicializace byly ponechány automatické. Poté se nastavoval samotný řešič. Základní nastavení byla tato:

- Advekční schéma (schéma přenosu proudění tepla) – High Resolution (druhý řád),
- Počet interakcí – maximálně 200 pro tento výpočet,
- Časové měřítko výpočtů – automatické,
- Délkové měřítko výpočtu – mírný odhad,
- Poměr mezi časovým měřítkem v tekutině a pevné látce – ponechán na původní hodnotě 1.0,
- Definice chyby výpočtu – RMS (chyba je definována střední kvadratickou odchylkou),
- Přesnost výpočtu – bylo nastaveno $1\text{E-}4$, což je hodnota pro běžné inženýrské úlohy.

Následovalo uložení daných úloh. Nastavil se běh řešiče. Typ řešiče se nastavil jako *Full*, čili plný běh řešiče. Úloha se řešila na jednom procesoru lokálně. Poté se spustilo řešení úlohy pro přirozené chlazení transformátoru a po dokončení těchto výpočtů následovalo řešení úlohy nuceného chlazení transformátoru.

7. Vyhodnocení výsledků

Dosažené výsledky jsou vyobrazeny v postprocesoru Post-CFD. V tomto programu nalezneme jak datové hodnoty, tak grafické výstupy či řešení úloh.

7.1 Počty elementů, doba výpočtu

Přirozené chlazení transformátoru:

- počet elementů: téměř 3 000 000
- doba výpočtu: 15 – 20 hodin

Nucené chlazení transformátoru:

- počet elementů: téměř 4 000 000
- doba výpočtu: 11 - 15 hodin

7.2 Grafické výstupy

7.2.1 Teploty jádra a cívek

Porovnáním Obr. 44 a Obr. 45 zjistíme, že teploty jader a cívek jsou v různých výškách odlišné. Cívky transformátoru s přirozeným chlazením mají po celé své ploše přibližně konstantní teplotu, viz Tab. 5. Důvodem je malá rychlost proudění oleje v nádobě transformátoru.

Transformátor	Teplota cívek nn	Teplota cívek vn
	°C	°C
s přirozeným chlazením	58 - 62,9	65
s nuceným chlazením	47,9 - 48,9	53 - 55

Tab. 5 – Porovnání teplot cívek transformátoru s přirozeným a nuceným chlazením.

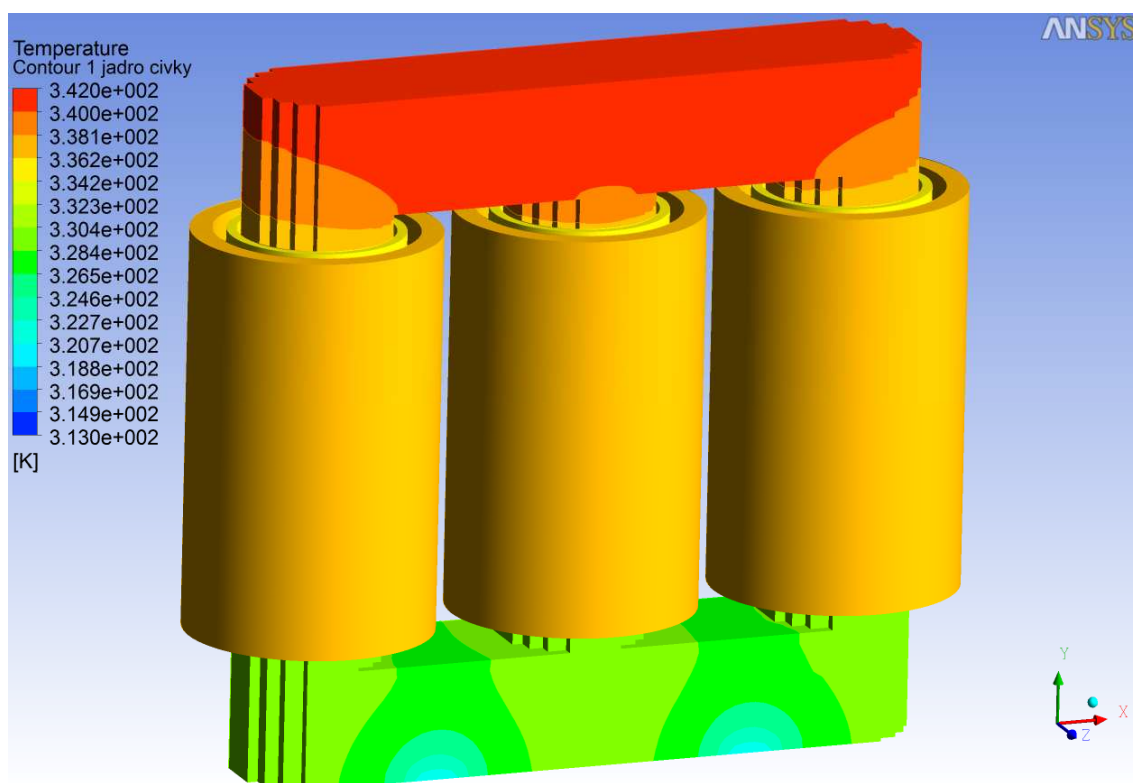
Naopak cívky transformátoru s nuceným chlazením mají teplotu v různých výškách rozdílnou, což je dáno nuceným oběhem oleje kolem jejich povrchu. Teplejší částice stoupají směrem nahoru k víku transformátoru a zahřívají tak jádro i cívky na rozdílnou teplotu.

Jádro transformátoru má nejnižší teplotu na dolní spojce. Nejvyšší teplota je na horní spojce jádra. Z řezů jednotlivých transformátorů lze názorně vidět zvětšující se oteplení sloupků spojek a cívek, viz Obr. 46 a Obr. 47.

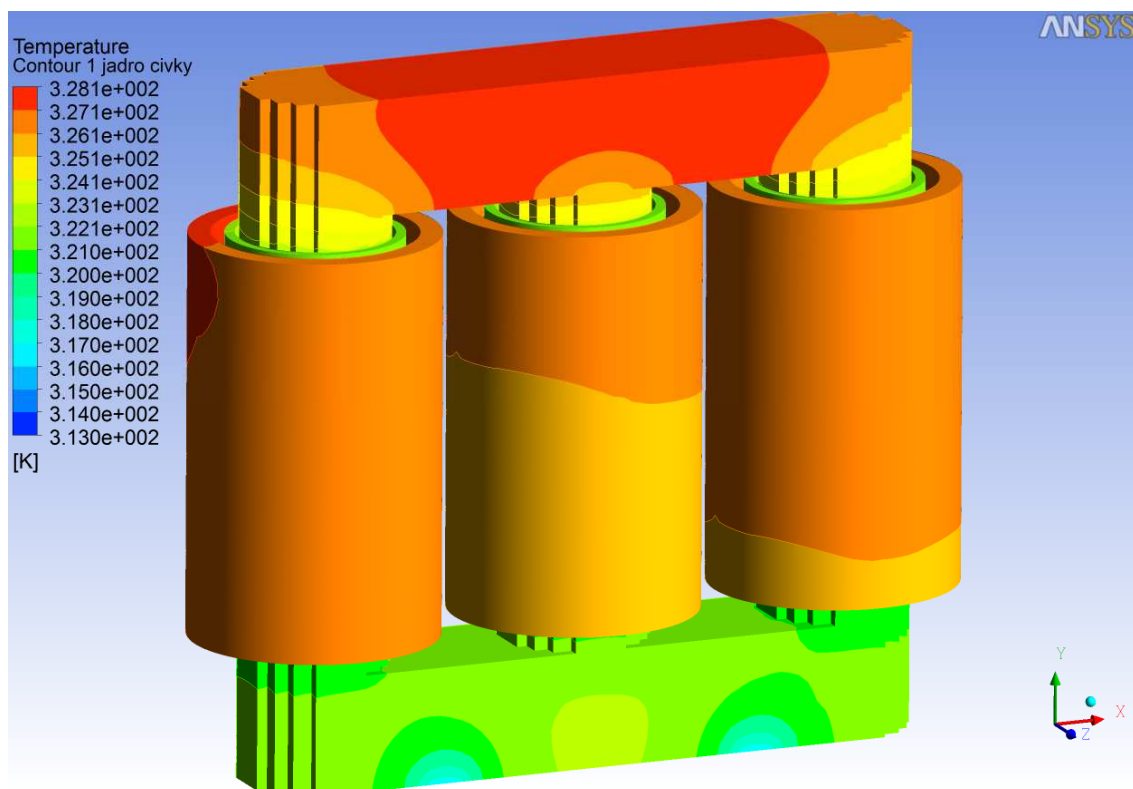
Transformátor s přirozeným chlazením se zahřívá na vyšší teplotu oproti transformátoru s nuceným chlazením. Proudící olej u transformátoru s nuceným chlazením tedy splňuje funkci chladicího média efektivně a odvádí teplo ze zahříváných částí, viz Tab. 6.

Transformátor	Počáteční teplota	Konečná teplota
	°C	°C
s přirozeným chlazením	40	68
s nuceným chlazením	40	54,9

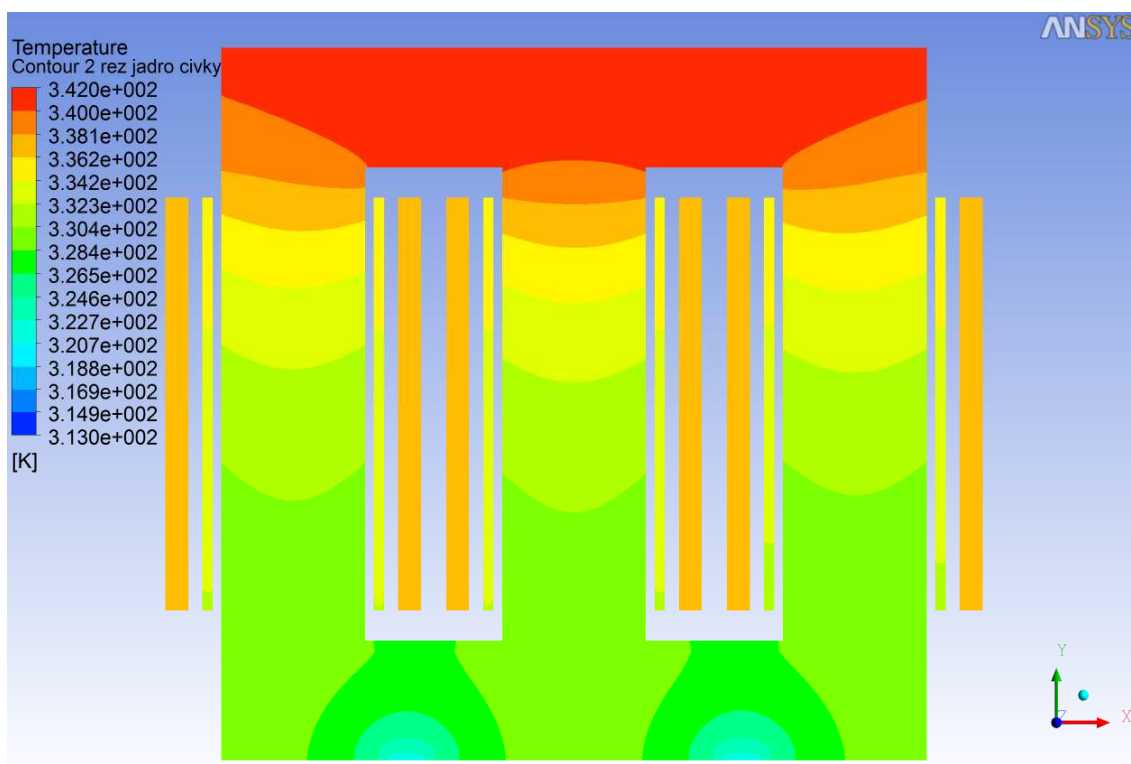
Tab. 6 – Rozdíl mezi počáteční a konečnou teplotou transformátorů.



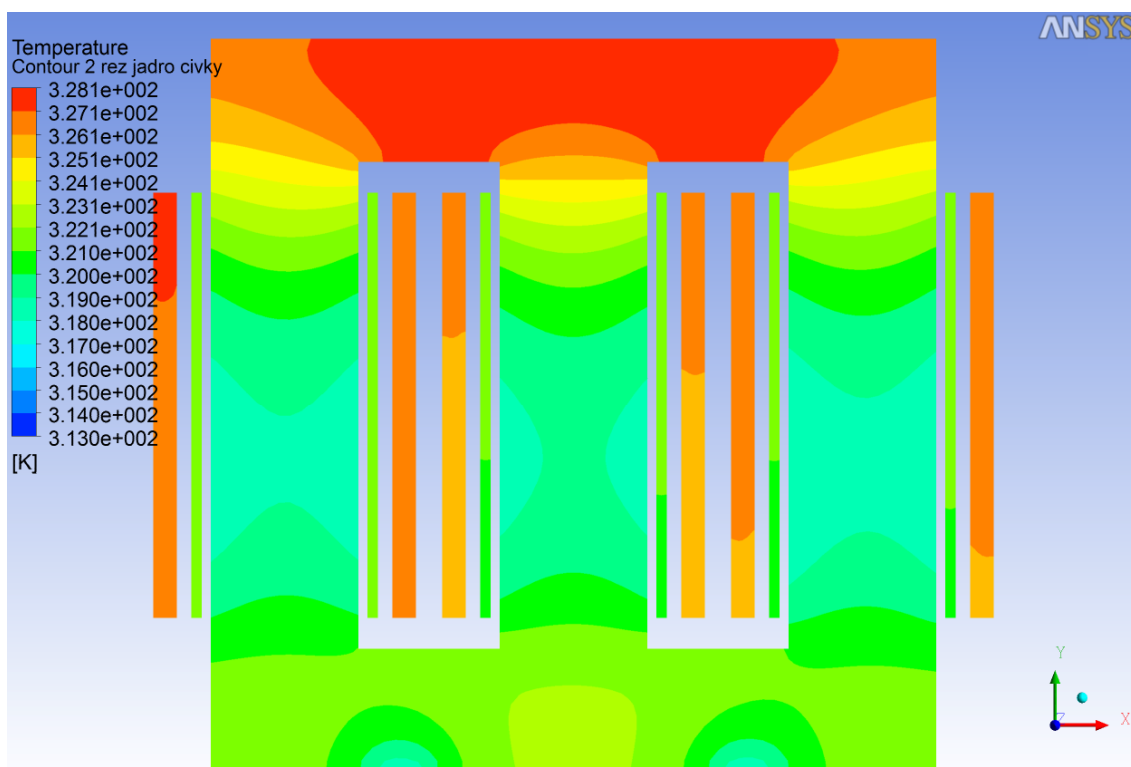
Obr. 44 – Teplota jádra a cívek transformátoru s přirozeným chlazením.



Obr. 45 – Teplota jádra a cívek transformátoru nuceným chlazením.



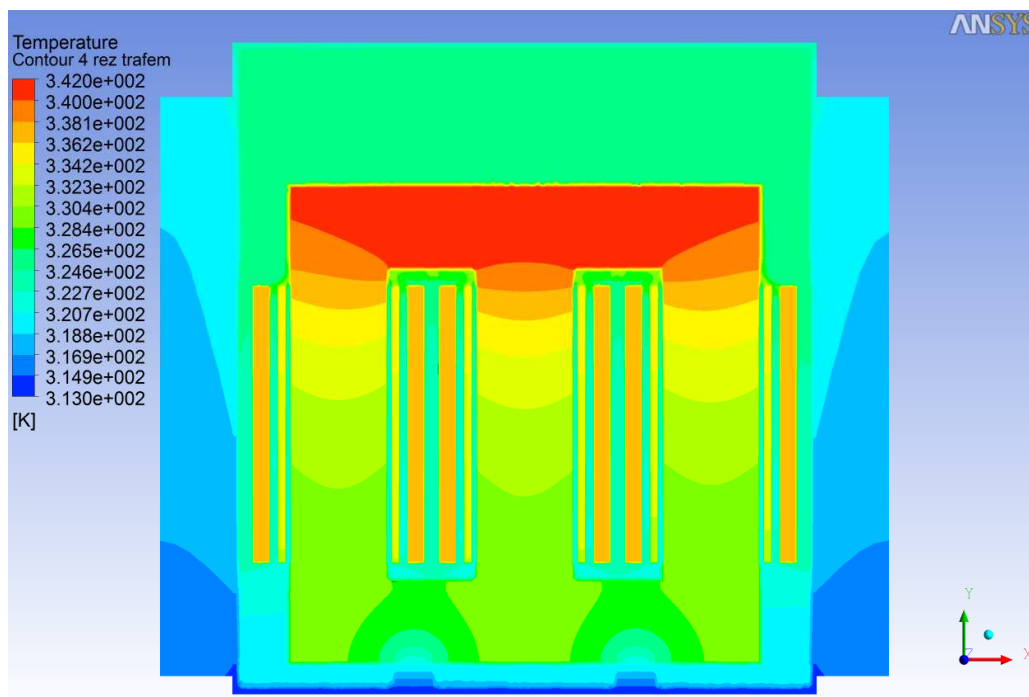
Obr. 46 – Zobrazení teploty jádra a cívek v řezu transformátoru s přirozeným chlazením.



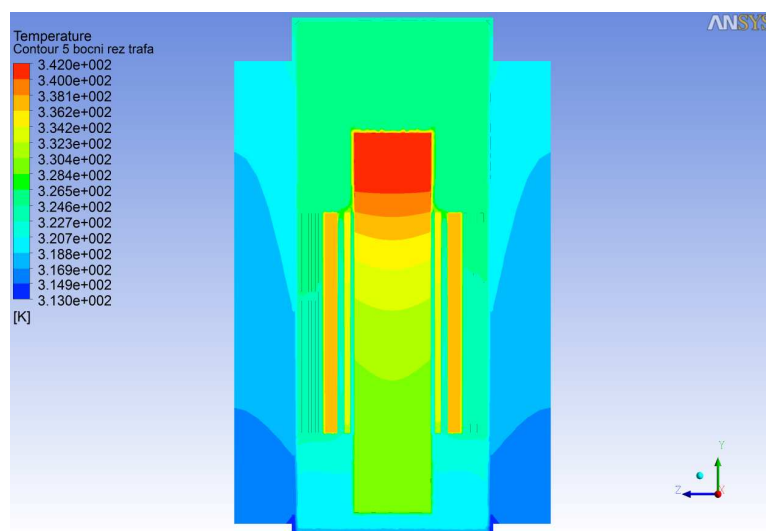
Obr. 47 – Zobrazení teploty jádra a cívek v řezu transformátoru s nuceným chlazením.

7.2.2 Teplota oleje, žeber

Teplota oleje u transformátoru s přirozeným chlazením dosahuje hodnoty maximálně 53°C, viz. Obr. 48. Rozdíl mezi teplotou na dně a pod víkem transformátoru činí 13°C. Plášť a žebra tohoto transformátoru se nijak výrazně nezahřívají. Jejich maximální teplota je 50°C, což znamená nárůst teploty o pouhých 10°C.

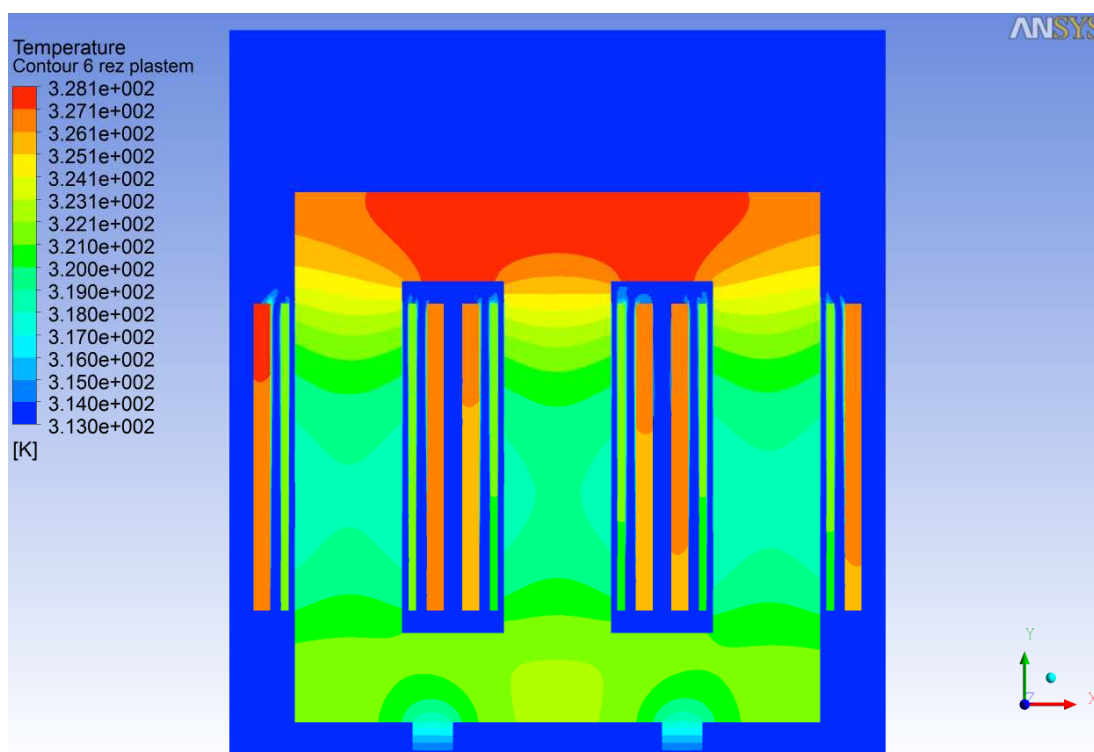


Obr. 48 – Řez transformátorem s přirozeným chlazením a zobrazení teplot jádra, cívek, oleje a žeber.

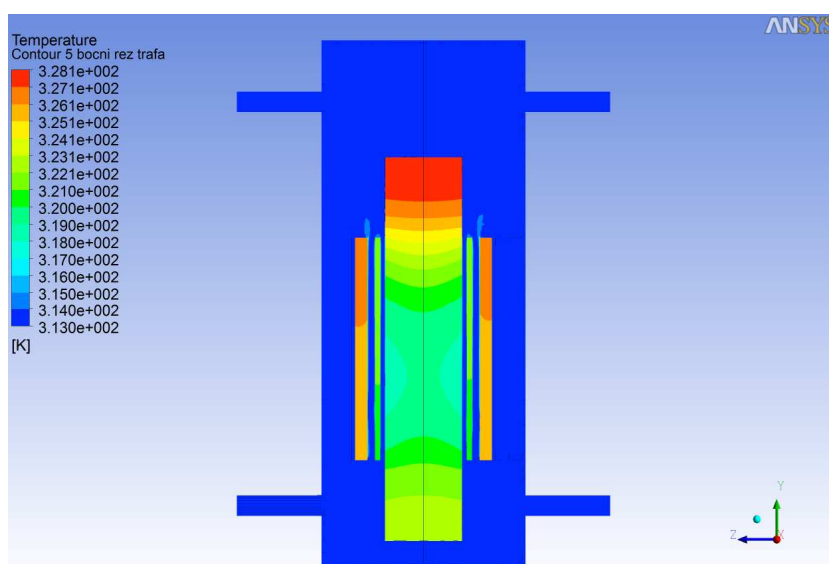


Obr. 49 – Boční řez transformátorem s přirozeným chlazením a zobrazení teplot jádra, cívek, oleje a žeber.

Olej transformátoru s nuceným chlazením se ohřeje maximálně o 1°C , viz Obr. 50. Je to dáno jeho cirkulací v nádobě. Do nádoby transformátoru je olej vháněn rychlostí 1 m.s^{-1} s počáteční teplotou 40°C . Výstupní rychlost oleje z nádoby transformátoru je $1,3 \text{ m.s}^{-1}$, přičemž teplota oleje je vyšší nanejvýše o 1°C . Rychlost proudění oleje bude znázorněna na dalších grafických výstupech.



Obr. 50 – Řez transformátorem s nuceným chlazením a zobrazení teploty jádra, cívek a oleje.



Obr. 51 - Boční řez transformátorem s přirozeným chlazením se zobrazením teplot jádra, cívek, oleje a žeber.

7.2.3 Rychlost a směr proudění oleje

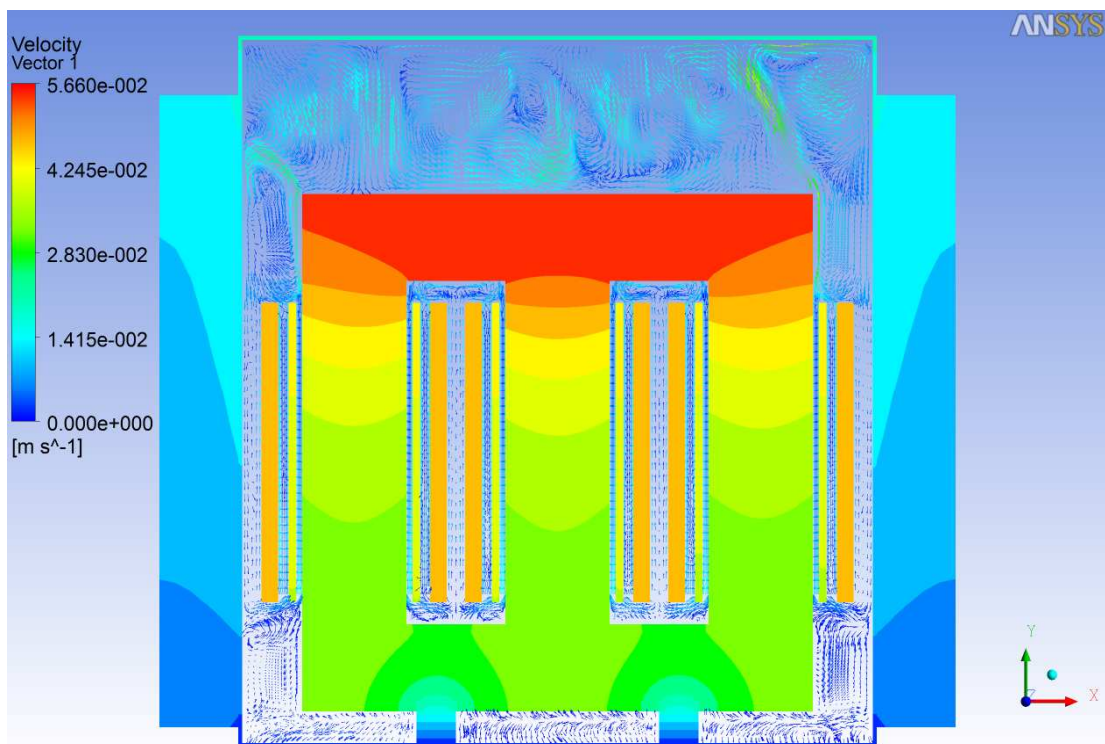
Z výsledku výpočetního programu vychází maximální rychlost oleje u transformátoru s přirozeným chlazením $5,66 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$. Tato rychlost je patrná nad horní spojkou jádra transformátoru. Pod jádrem transformátoru je rychlost toku oleje prakticky nulová, viz Obr. 52 a Obr. 58.

Jak je z Obr. 52 zřejmé, dochází nad velkou vodorovnou plochou (horní spojkou) k systému vírů. Tato skutečnost odpovídá teoretickým předpokladům, viz Obr. 18. Pod víkem transformátoru dochází k nárůstu rychlosti konvekce a v horních rozích nádoby se mění směr proudění odrazem od těchto ploch a vrací se zpět do prostoru nad horní spojkou.

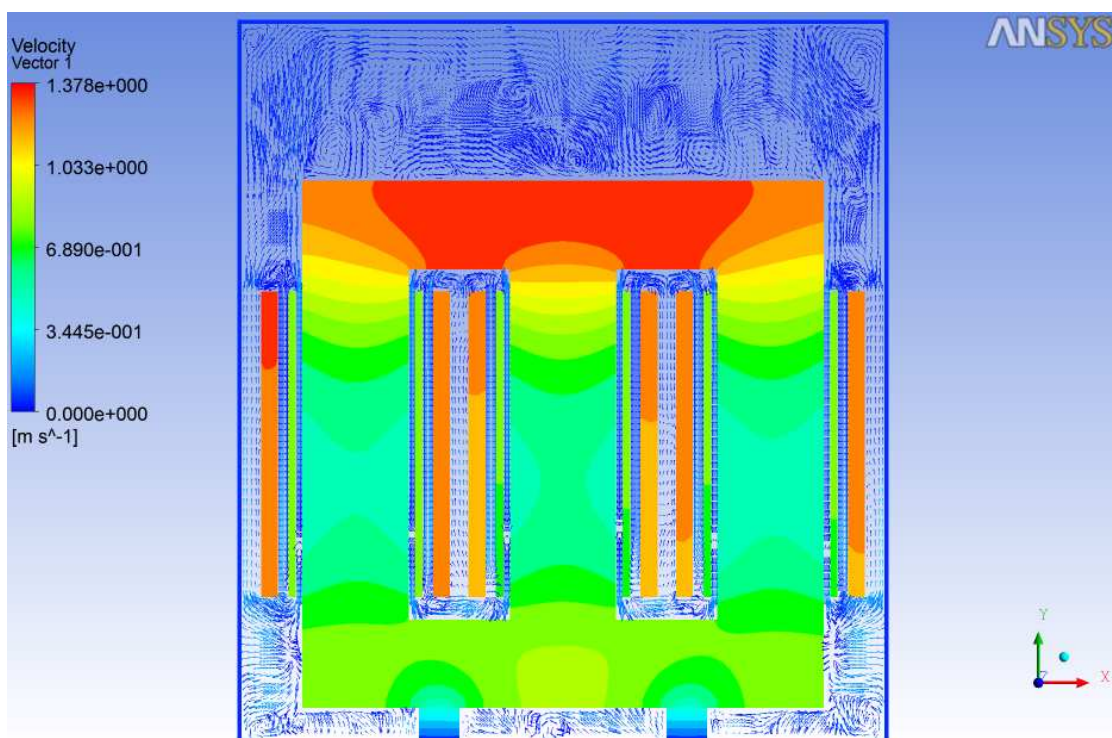
Pod cívkami dochází k mírnému víření, olej se v některých místech vrací dolů, ale následně je zachycen proudem toku oleje s vyšší teplotou a společně s ním směřuje vzhůru kolem svislých rovinných ploch cívek. Nad cívkami jsou patrné systémy vírů. Vše odpovídá teoretickým předpokladům, viz Obr. 17, 18, 19.

Do transformátoru s nuceným chlazením je olej vháněn rychlostí 1 m.s^{-1} . Výstupní rychlost oleje je programem vypočtena na $1,378 \text{ m.s}^{-1}$, viz Obr. 59. Nuceným oběhem je zajištěna cirkulace oleje všemi volnými mezerami kolem transformátoru. Proudění oleje není v okolí cívek tak chaotické, což přispívá k efektivnějšímu chlazení transformátoru.

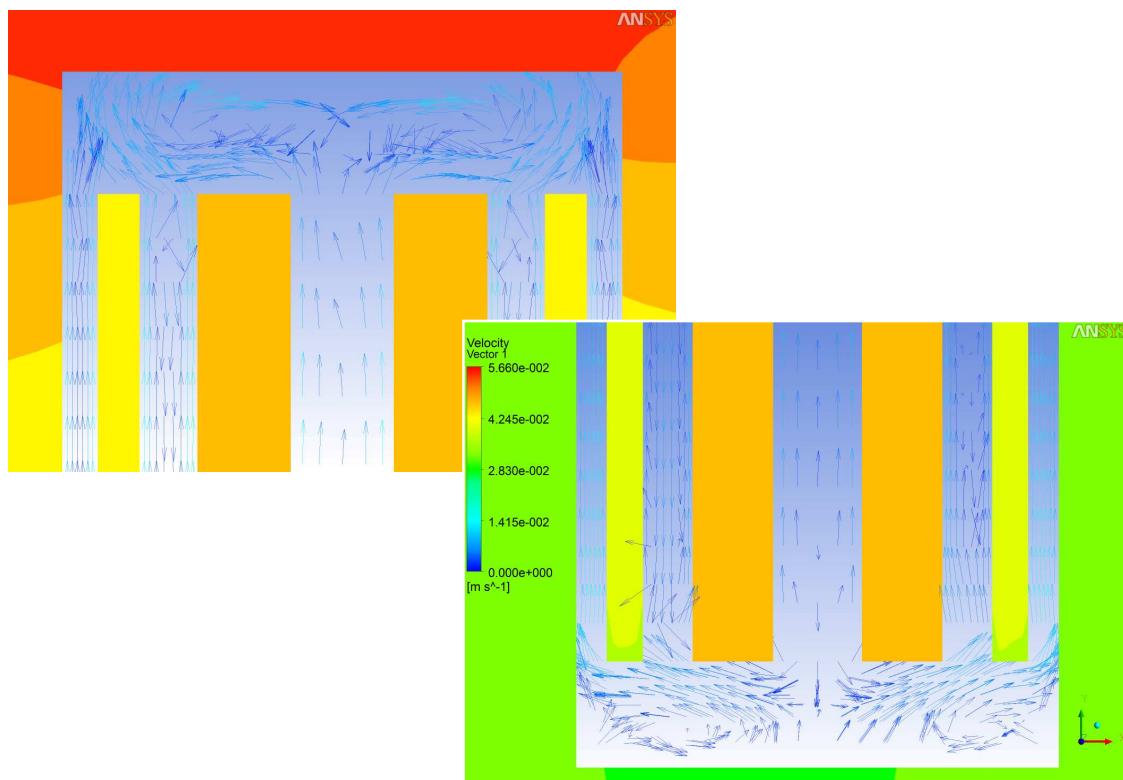
Na proudění oleje má vliv výška tělesa, zaoblení hran, rozsáhlé plochy apod. Výsledky modelování proudění kapalin ve výpočetním programu potvrzují teoretické předpoklady.



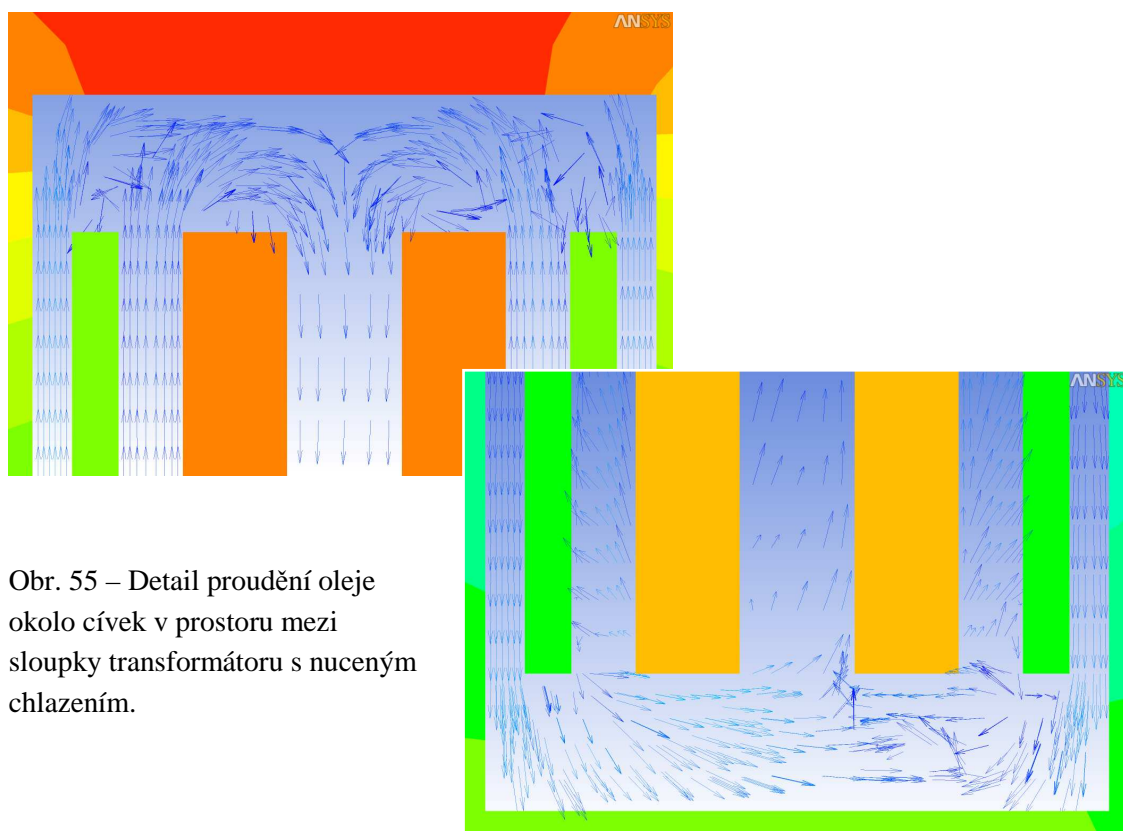
Obr. 52 – Rychlost a směr proudění oleje v nádobě transformátoru s přirozeným chlazením.



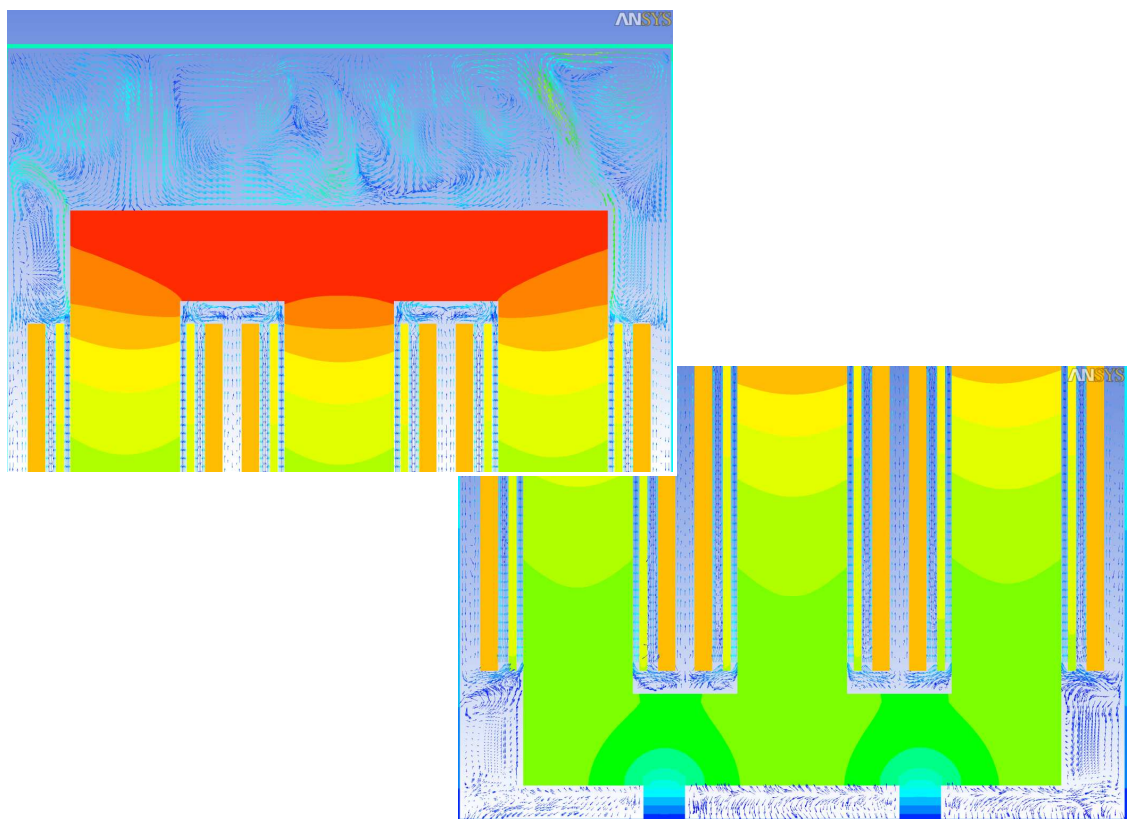
Obr. 53 – Rychlost a směr proudění oleje v nádobě transformátoru s nuceným chlazením.



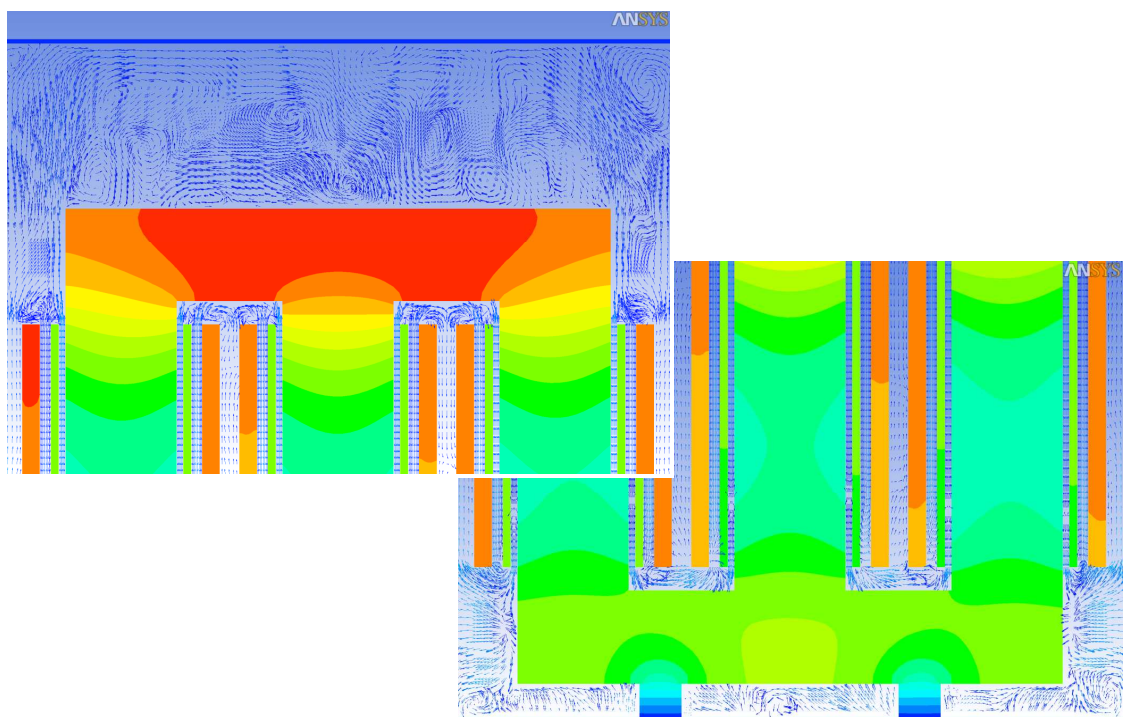
Obr. 54 – Detail proudění oleje okolo cívek v prostoru mezi sloupky transformátoru s přirozeným chlazením.



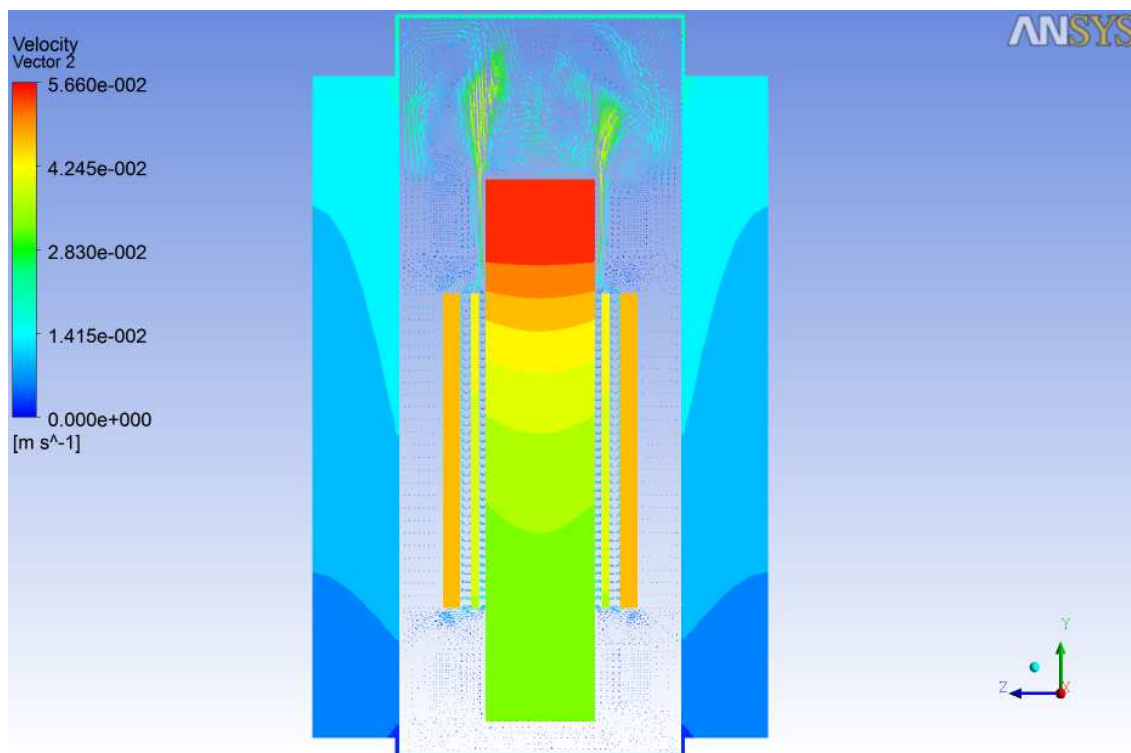
Obr. 55 – Detail proudění oleje okolo cívek v prostoru mezi sloupky transformátoru s nuceným chlazením.



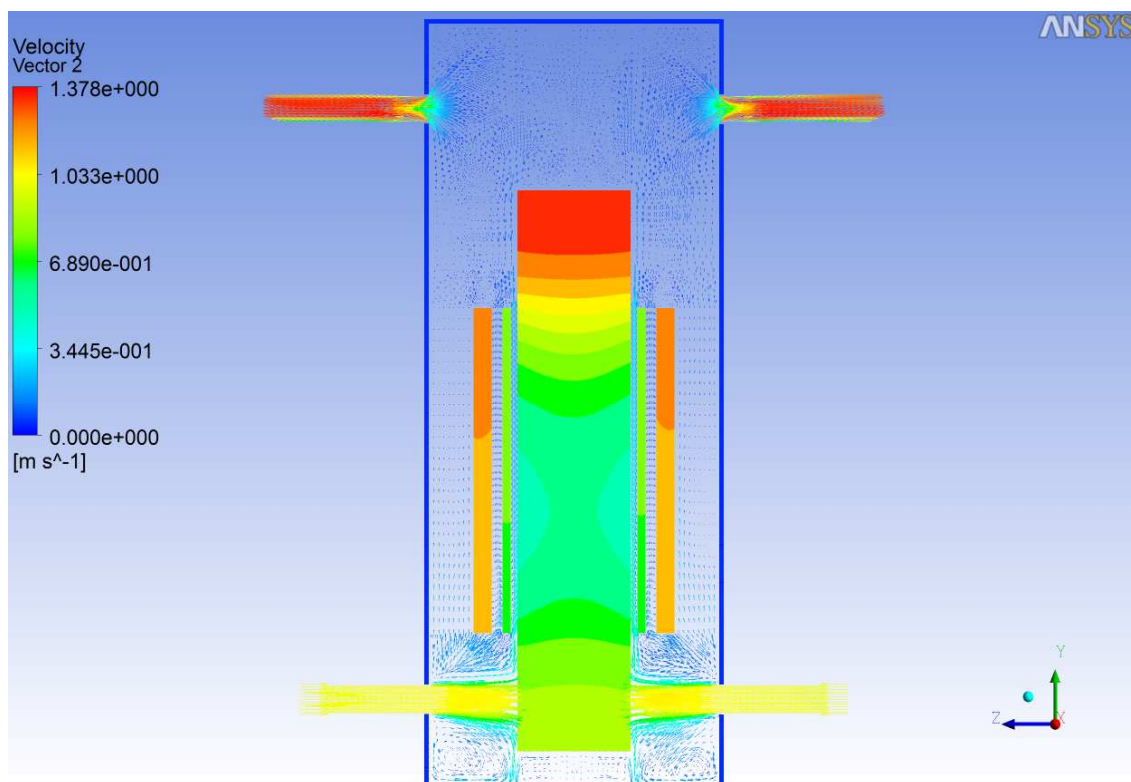
Obr. 56 – Detaily proudění oleje v nádobě transformátoru s přirozeným chlazením.



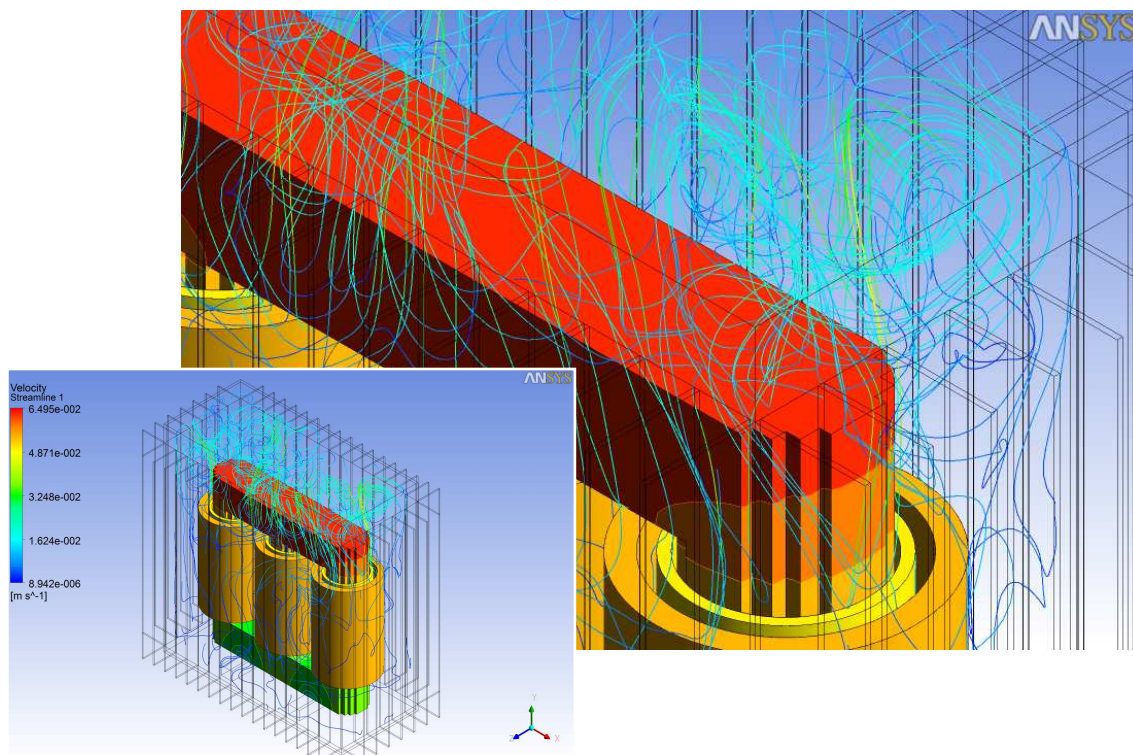
Obr. 57 – Detaily proudění oleje v nádobě transformátoru s nuceným chlazením.



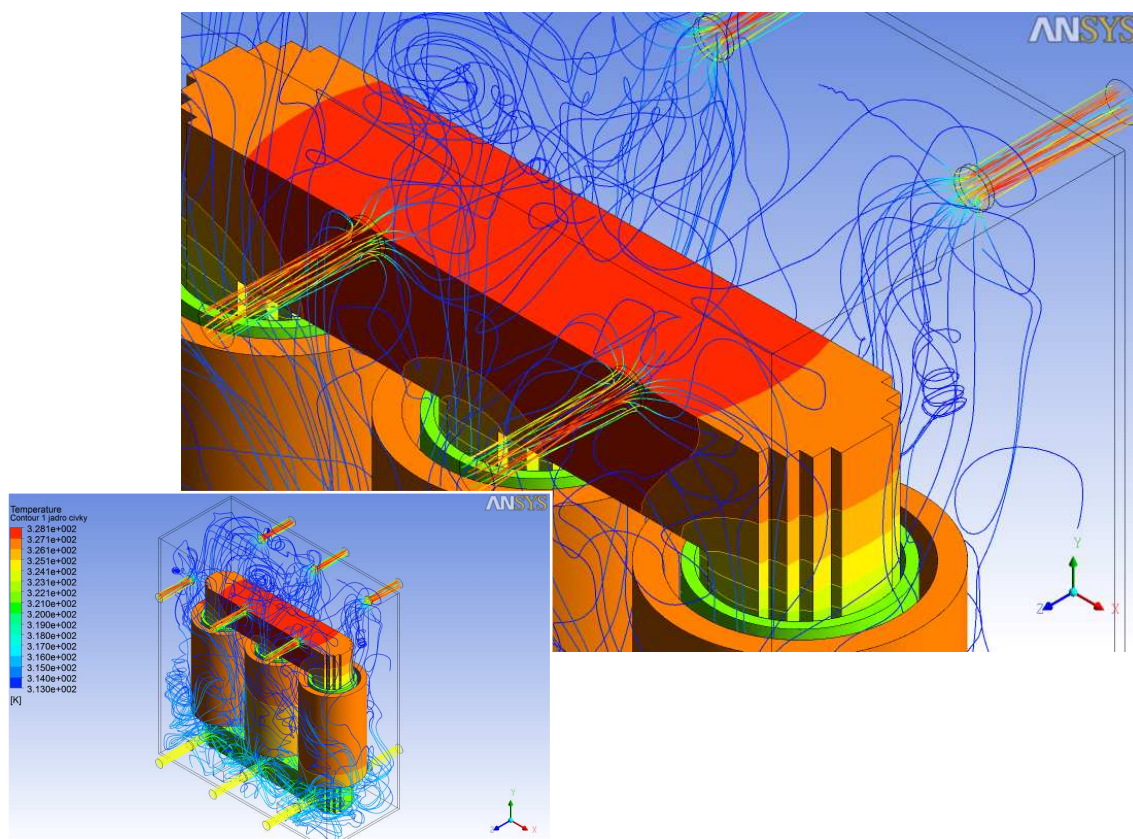
Obr. 58 – Rychlost proudění oleje transformátorem s přirozeným chlazením z bočního pohledu.



Obr. 59 – Rychlost proudění oleje do/z nádoby transformátoru s nuceným chlazením z bočního pohledu.

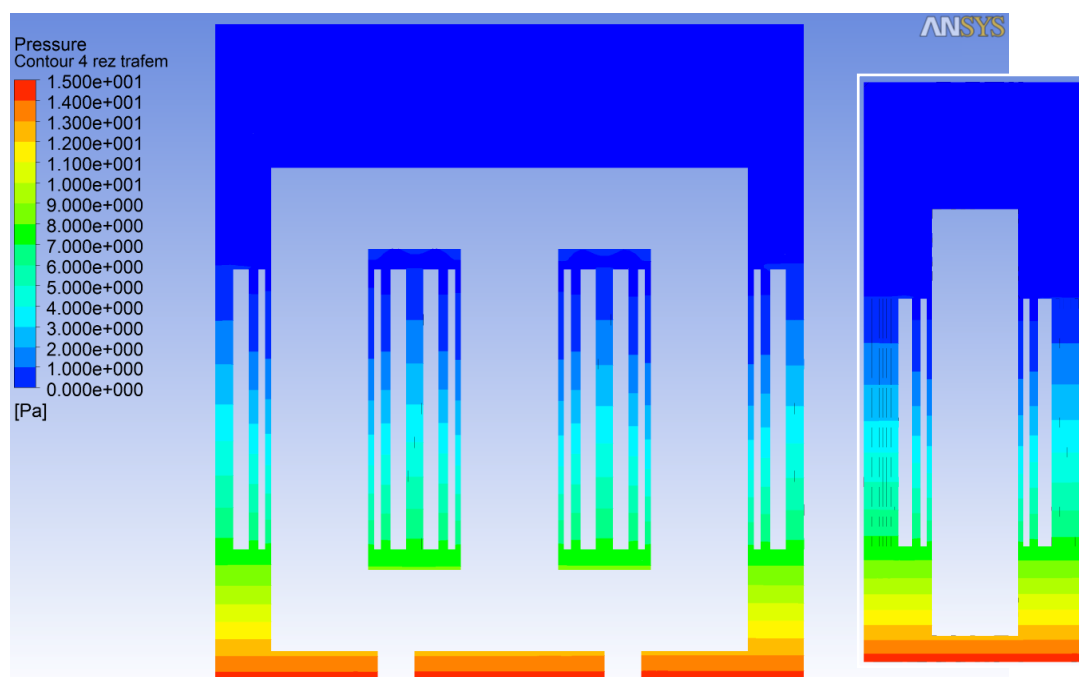


Obr. 60 – Zobrazení toku oleje pomocí proudnic pro transformátor s přirozeným chlazením.

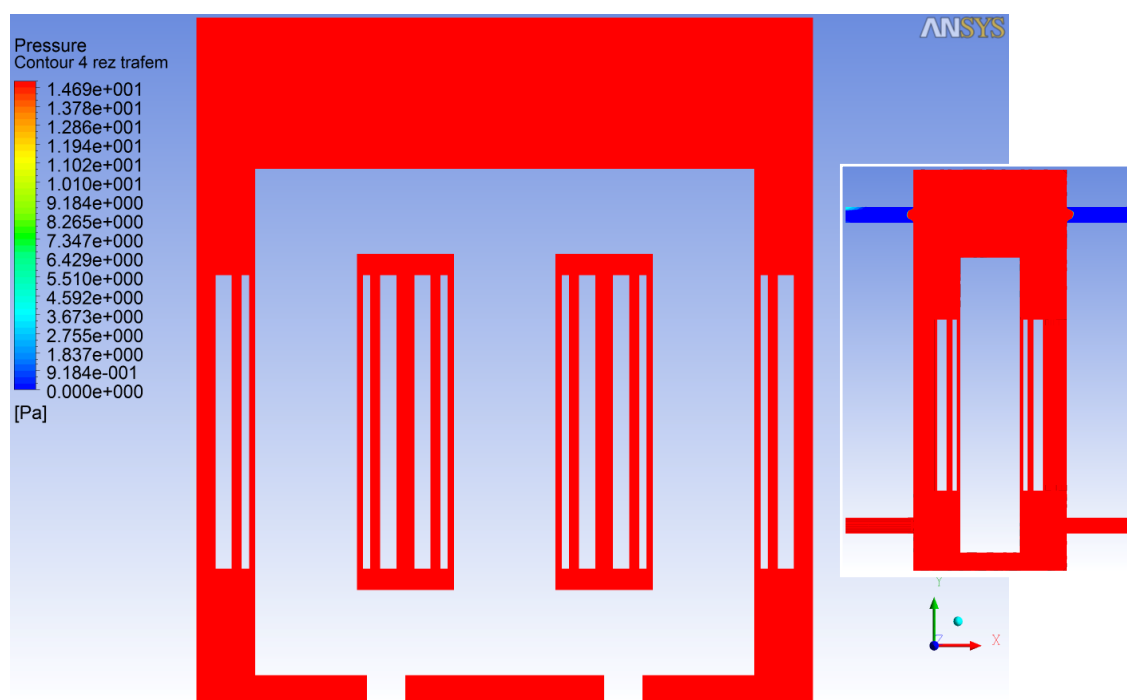


Obr. 61 – Zobrazení toku oleje pomocí proudnic pro transformátor s nuceným chlazením.

7.2.4 Tlak oleje



Obr. 62 – Tlak oleje v nádobě transformátoru s přirozeným chlazením (i v bočním řezu).



Obr. 63 – Tlak oleje v nádobě transformátoru s nuceným chlazením (i v bočním řezu).

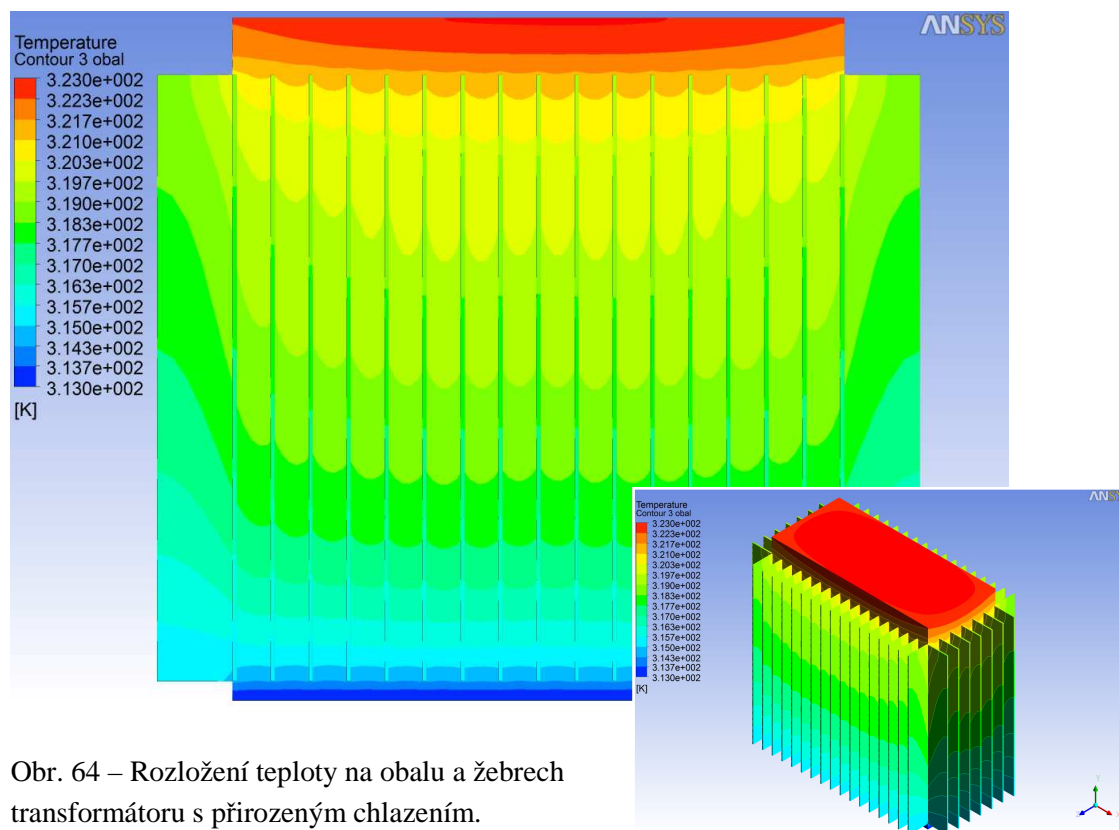
Tlak v nádobě transformátoru s přirozeným chlazením je největší na dně nádoby a šíření tlaku v kapalině je rovnoměrné. Dosazuje hodnoty 15 Pa. Se zvyšující se výškou nádoby tlak klesá a pod víkem je tlak prakticky nulový, viz Obr. 62.

V nádobě transformátoru s nuceným chlazením je tlak v celém objemu rovnoměrný, viz Obr. 63. Hodnota tlaku je 14,7 Pa. Tento rozdíl je dán nuceným oběhem transformátorového oleje, kdy se zahřátý olej dostává do všech částí transformátoru.

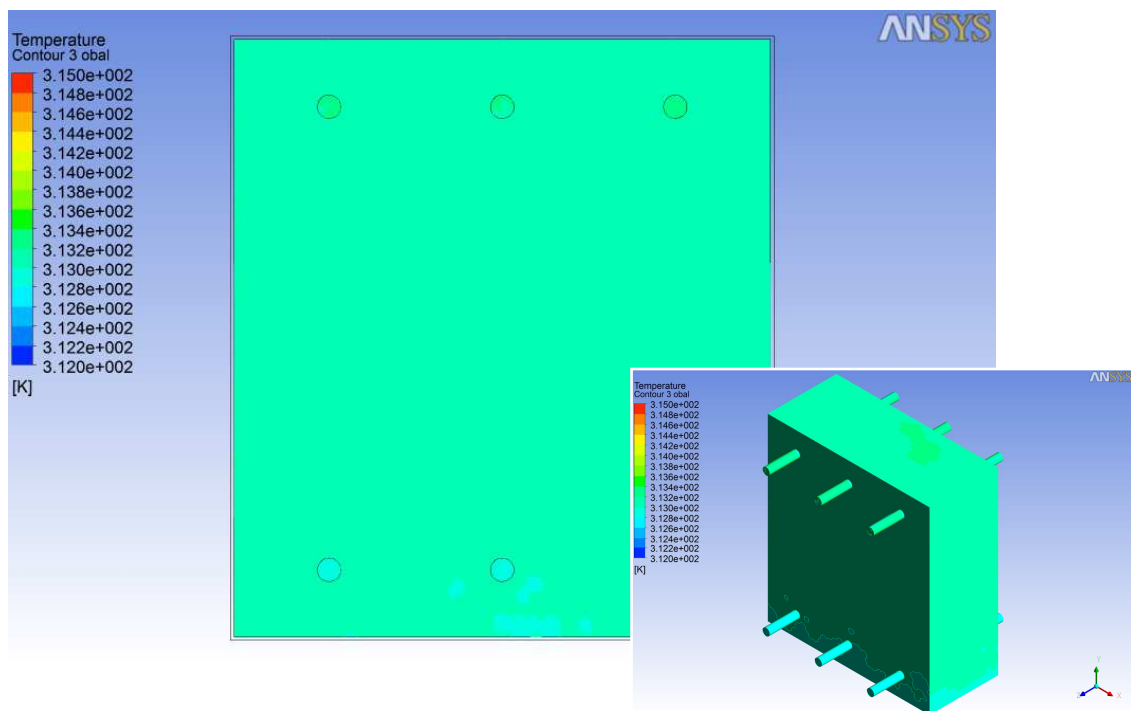
7.2.5 Teplota obalu transformátoru

Obal transformátoru s přirozeným chlazením se zahřívá postupně po celé své výšce od počáteční hodnoty 40°C na dně transformátoru až na teplotu přibližně 50°C na víku transformátoru, viz Obr. 64. Částice oleje, dotýkající se teplého povrchu magnetické obvodu a vinutí, se ohřívají, stoupají vzhůru a své teplo odevzdávají přes stěny a víko nádoby do okolí. Ochlazené částice oleje klesají dolů a uvolňují místo teplejším. Rozdíl teploty nádoby transformátoru a okolního prostředí je několik desítek stupňů. Výsledné hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům.

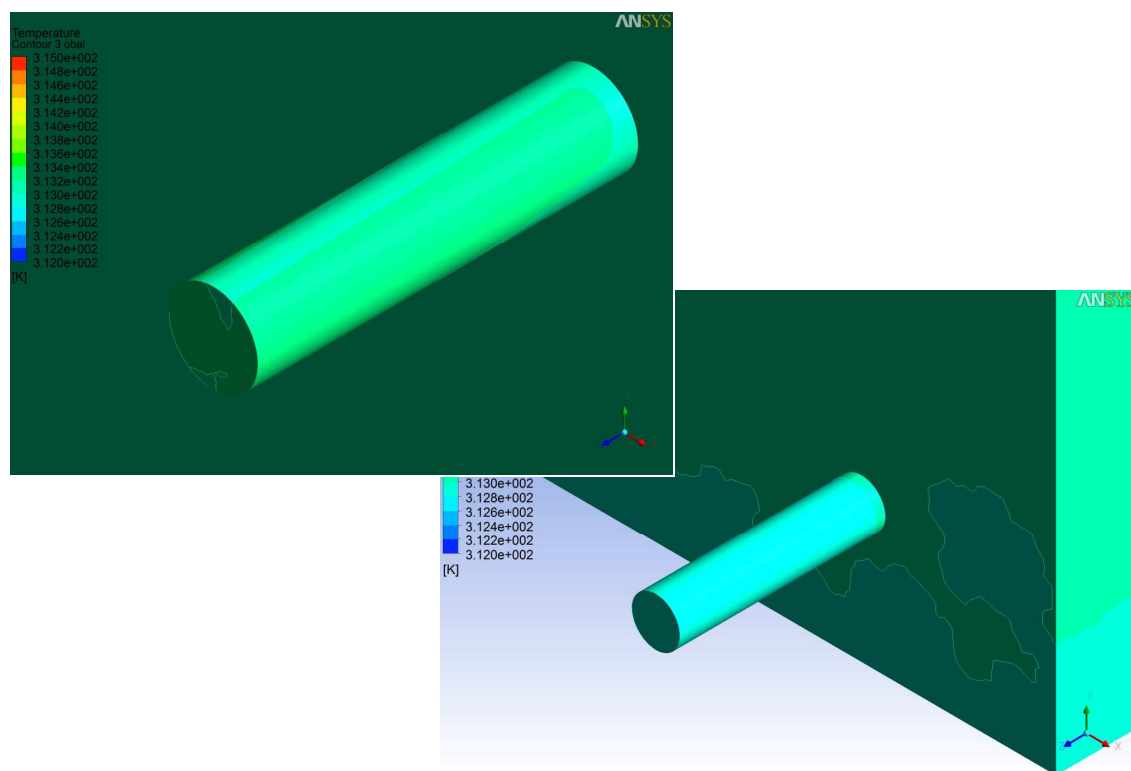
Plášť transformátoru s nuceným chlazením se oproti přirozenému chlazení příliš nezahřeje, viz Obr. 65. Teplo je efektivně odváděno proudícím olejem mimo nádobu transformátoru, avšak k jistému zahřátí nádoby dojde. Maximální teplota nádoby je na víku transformátoru a činí přibližně 42°C. Olej vháněný do nádoby má teplotu 40°C, olej vystupující z nádoby má teplotu okolo 41°C.



Obr. 64 – Rozložení teploty na obalu a žebrech transformátoru s přirozeným chlazením.

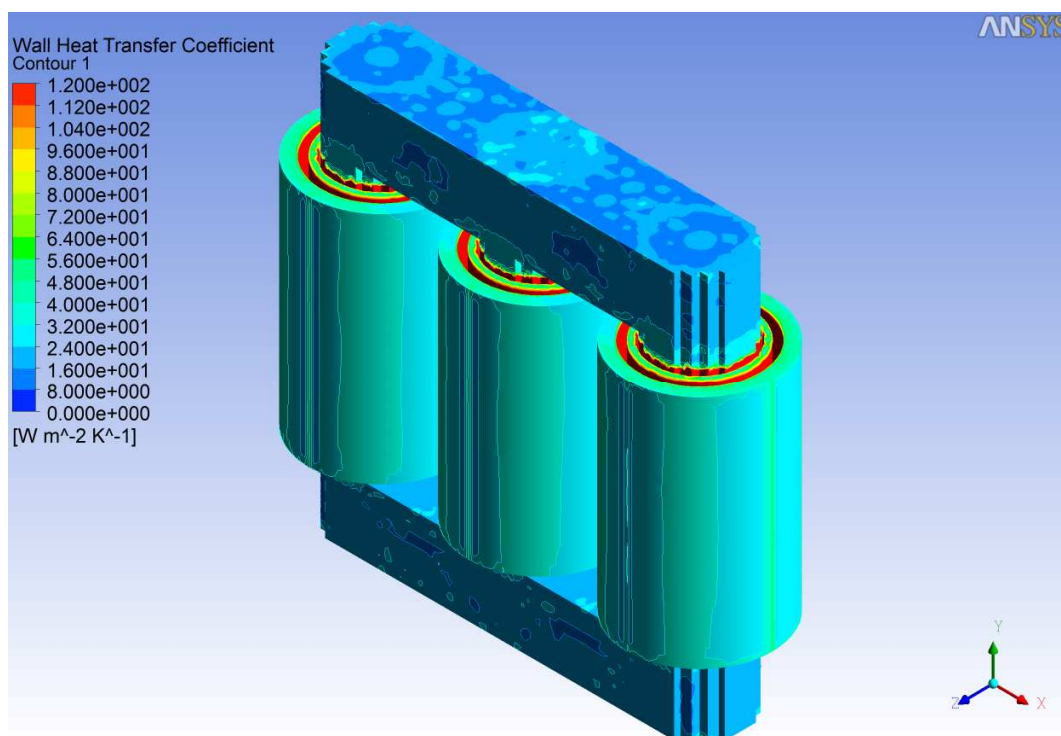


Obr. 65 – Rozložení teploty na obalu a trubkách transformátoru s nuceným chlazením.

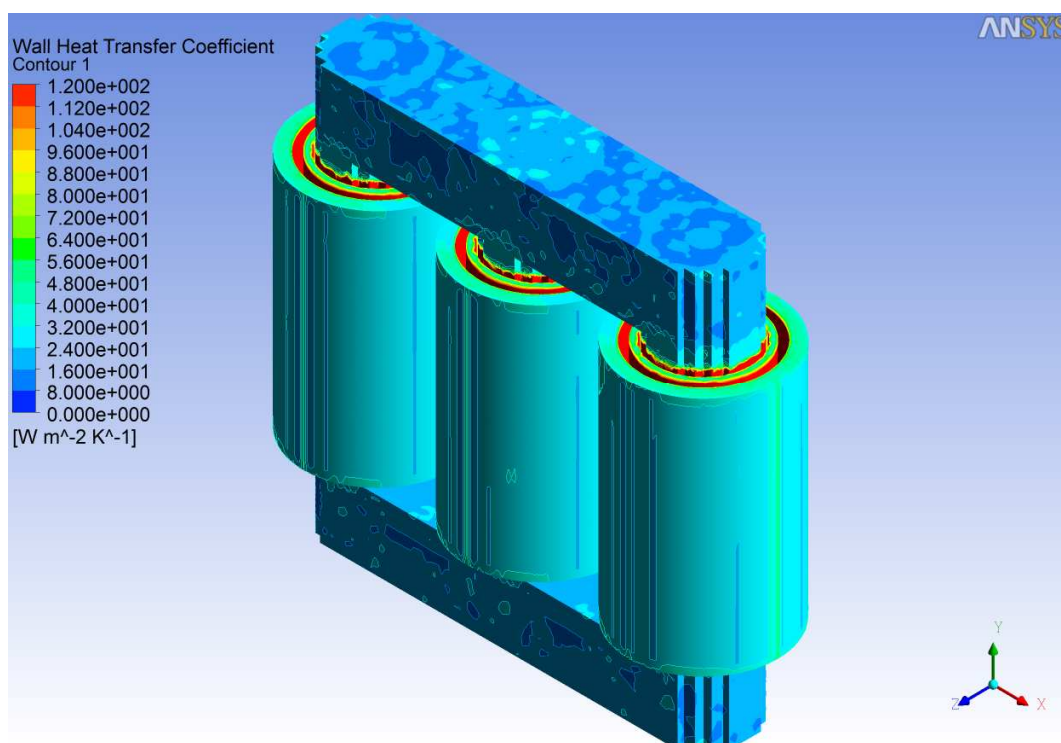


Obr. 66 – Detaily rozložení teploty na odtokové a přítokové trubce transformátoru s nuceným chlazením.

7.2.6 Součinitel přestupu tepla



Obr. 67 – Součinitel přestupu tepla transformátoru s přirozeným chlazením.



Obr. 68 – Součinitel přestupu tepla transformátoru s nuceným chlazením.

Součinitel přestupu tepla α představuje ztráty ve wattech, které odevzdá okolnímu prostředí 1 m² chladícího povrchu tělesa při rozdílu teploty tělesa a prostředí 1 °C. Součinitel přestupu tepla α závisí na fyzikálních vlastnostech – měrné tíži, hustotě, tepelné vodivosti, viskozitě, tepelné kapacitě kapalného nebo plynného prostředí, tvaru a umístění tělesa, způsobu opracování jeho povrchu aj. [6]

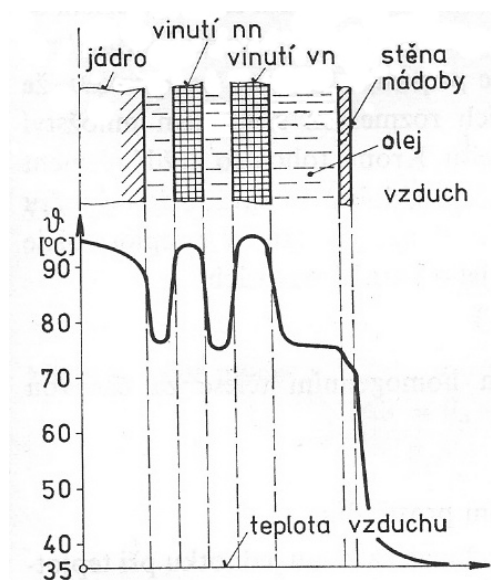
Nejmenší hodnota součinitele přestupu tepla u transformátoru s přirozeným chlazením je na obou spojkách jádra. Zde se hodnoty součinitele přestupu tepla pohybují v rozmezí 16 – 40 W.m⁻².K⁻¹. Na cívkách se jedná o hodnotu okolo 56 W.m⁻².K⁻¹. Největší hodnoty součinitele přestupu tepla je dosaženo v mezerách mezi sloupky a cívkami nn a mezi cívkou nn a cívkou vn. Zde se hodnota součinitele přestupu tepla pohybuje na hodnotě 120 W.m⁻².K⁻¹.

Obdobných hodnot součinitele přestupu tepla se dosahuje i u transformátoru s nuceným chlazením, jeho rozložení je však na jádře a cívkách transformátoru lehce odlišné.

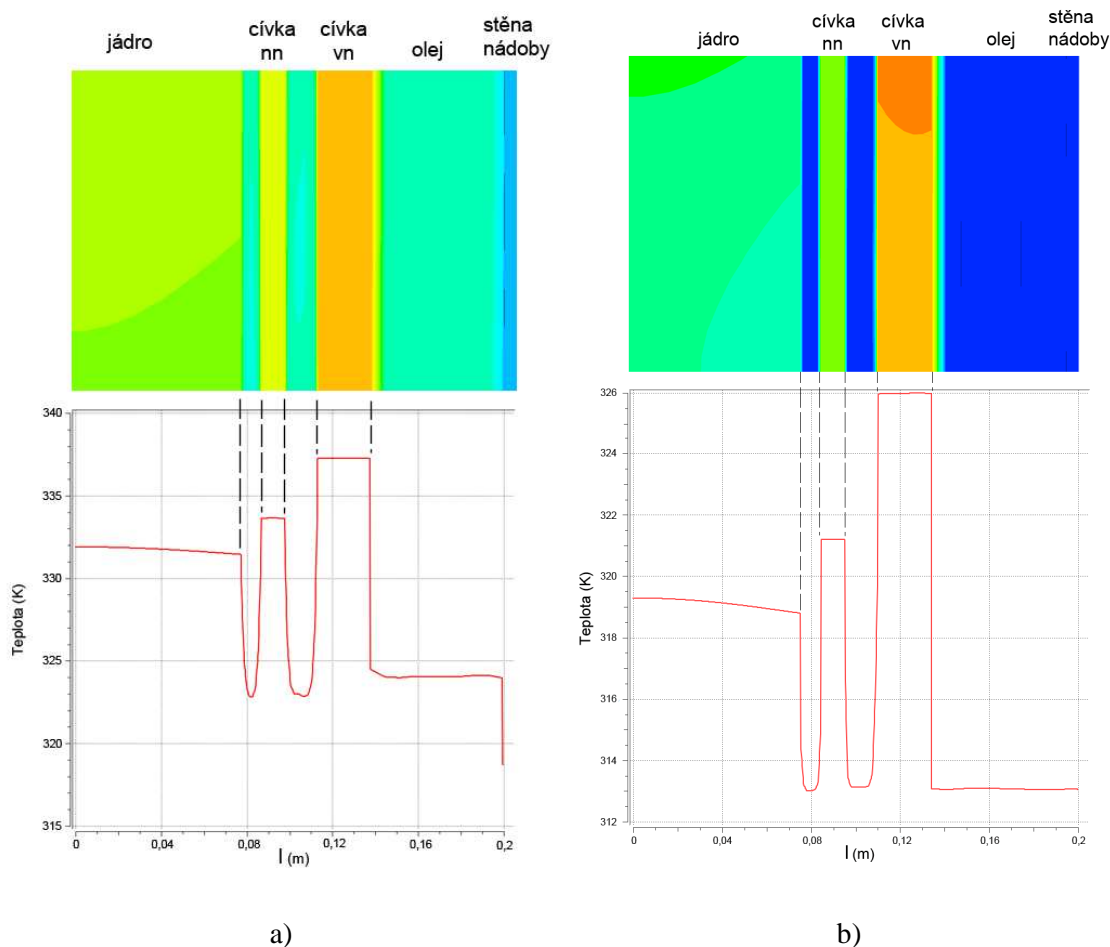
Pro detailnější znázornění součinitele přestupu tepla by bylo zapotřebí vytvořit mnohem jemnější výpočtovou síť. Tím by se zvětšil počet elementů řádově o statisíce a doba potřebná pro řešení úlohy by se prodloužila o několik hodin, možná i desítek hodin.

7.3 Rozložení teplot v řezu transformátoru

Magnetický obvod a vinutí je omýváno transformátorovým olejem. Částice oleje, jenž se dotýkají teplých povrchů, se ohřívají. Následně stoupají vzhůru, své teplo odevzdávají přes stěny a víko nádoby do okolního prostředí. Následující grafické výstupy ukazují, že se mezi magnetickým obvodem a olejem ustálí určitý rozdíl teplot, viz Obr. 70a, 70b. Teploty oleje a jiných částí transformátoru jsou v různých výškách nádoby odlišné.



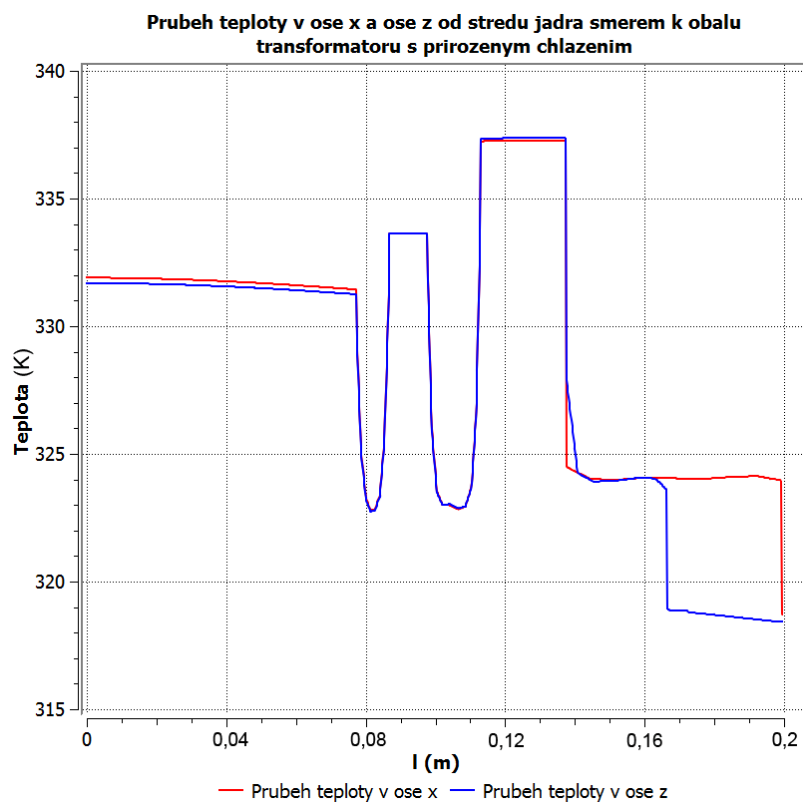
Obr. 69 - Typické rozložení teploty ve vodorovném řezu olejového transformátoru. [2]



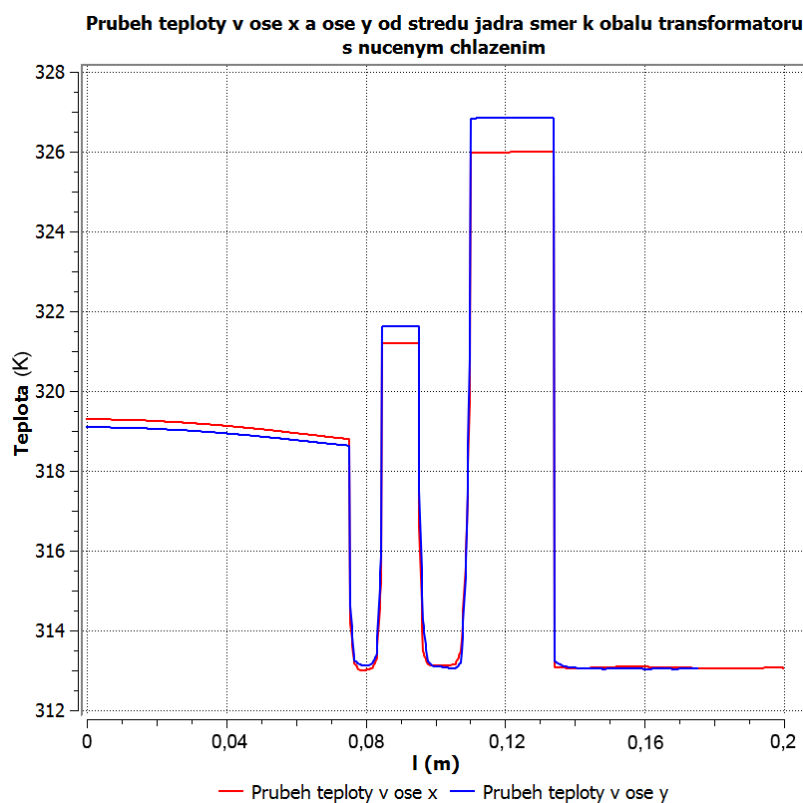
Obr. 70 – Rozložení teploty ve vodorovném řezu transformátoru získané z výpočetního softwaru: a) přirozeně chlazený transformátor, b) transformátor s nuceným oběhem chladicí kapaliny.

Od středu jádra směrem k oleji je pokles teploty minimální. Následuje teplotní spád o 10°C , který značí teplotu oleje. Poté dochází opět k vzestupu teploty, jelikož na řadu přichází cívka nn. Za cívkou nn se opět opakuje teplotní spád a posléze vzestup teploty na nejvyšší teplotu reprezentující oteplení cívky vn. Nakonec hodnota teploty padá na 47°C , protože olej předává teplo stěně nádoby transformátoru, která obdržené teplo odevzdává okolnímu, méně teplému prostředí.

Průběh teploty je ve směru osy x a osy z stejný, jelikož má transformátor souměrnou geometrii. Obě křivky kopírují průběh teploty až do vzdálenosti 0,165 m od středu jádra, viz Graf 5 a Graf 6. Rozdíl je způsobem odlišnou velikostí mezery mezi cívkou vn a obalem transformátoru na přední (zadní) a bočních stěnách nádoby, viz Příloha 2 a Příloha 3. Za touto hranicí je teplo odevzdáno skrze plášť transformátoru žebřům (u přirozeného chlazení) a následně do okolního prostředí. Stejná situace probíhá rovněž u transformátoru s nuceným chlazením. Jen s tím rozdílem, že teplota cívek v ose y u transformátoru s nuceným chlazením je o několik desetin stupňů vyšší. Důsledkem tohoto je transformátorový olej, který omývá cívky a svojí teplotou je ohřívá v různých výškách na rozdílné teploty.



Graf 5 – Srovnání průběhů teplot od středu jádra k plášti transformátoru s přirozeným chlazením.



Graf 6 - Srovnání průběhů teplot od středu jádra k plášti transformátoru s nuceným chlazením.

7.4 Porovnání dosažených výsledků s analytickými výpočty

Oteplení	Počáteční teplota	Dosažená teplota	Oteplení	Oteplení z analytických výpočtů
	°C	°C		°C
železa	40	68	28	23,8
cívky nn	40	62,9	22,9	24,8
cívky vn	40	65	25	18,2
nádoby	40	50	10	35,2

Tab. 7 – Porovnání hodnot oteplení získaných z numerického modelování s analytickými výpočty.

Výsledné hodnoty oteplení částí transformátoru se v některých případech výrazně neliší, v jiných naopak dochází k velikým rozdílům. Analytický výpočet uvádí, že chladicí plochou cívky nn je asi 80% vnějšího pláště cívky a 20% je zakryto distančními vložkami. Tyto hodnoty jsou použity při výpočtech oteplení železa i obou cívek. Pro každý prvek je ve skutečnosti nutné dané velikosti určit zvlášť. Numerický model transformátoru je velice zjednodušený, distanční vložky apod. u něj nejsou vůbec modelovány, avšak přesnost výpočtů je mnohem pravdivější, než je tomu u výpočtů analytických. Výrazného rozdílu ve výsledku oteplení si je možné všimnout na oteplení cívky vn. Analýza uvádí jako nejvíce oteplující se prvek cívkou nn. Ovšem cívka vn se oteplí více než cívka nn a numerické výpočty udávají jako prvek s nejvyšším oteplením železo. Tyto rozdíly jsou dány nepřesností analytických výpočtů a úpravou řešeného numerického modelu transformátoru.

8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo ukázat, jak je možné využít moderní výpočetní programy při řešení složitých inženýrských problémů. Tématem této diplomové práce bylo simulování přirozeného a nuceného chlazení olejového transformátoru v ustáleném stavu s reálnými rozměry a hodnotami.

K simulaci byla využita metoda konečných prvků MKP, pomocí které lze provádět výpočty deformací a metoda konečných objemů CFD, jež se využívá pro zjišťování proudových polí.

Pro vytvoření numerických modelů transformátorů byl využit CAD software SolidWorks. V tomto softwaru byl vytvořen model transformátoru jak pro přirozené, tak pro nucené chlazení. Následně byly oba modely ve formátu Parasolid importovány do výpočetního programu Ansys Workbench. V tomto programu se provedlo sjednocení objemů, definice základních prvků, zda se jedná o pevnou či tekutou část a vytvoření výpočetní sítě. Tvorba výpočetní sítě je jedním z nejdůležitějších kroků při přípravě numerického modelu. Jemnost sítě zásadně ovlivňuje získané výsledky. Čím bude síť jemnější, tím přesnějších výsledků lze dosáhnout. V našem případě obsahovala výpočetní síť téměř 4.000.000 elementů, což dostatečně postačuje pro řešení této diplomové práce. Síť by mohla být mnohem jemnější, avšak náročnost tvorby takové sítě se několikanásobně zvětšuje a s tím také náročnost na výpočet a doba výpočtu. Následovala tvorba výpočetních oblastí, definice materiálových vlastností, zatížení a okrajových podmínek. Po nezbytném nastavení řešiče (Solveru) bylo možné spustit samotnou simulaci (výpočet).

Výpočet přirozeně chlazeného transformátoru trval počítači s využitím jednoho procesoru téměř 15 – 20 hodin. Výpočet nuceného chlazení transformátoru trvalo na stejném počítači 11 - 15 hodin. V průběhu výpočtů je možné kontrolovat vypočítaná data, aby se případně upravilo nastavení simulované úlohy.

K zobrazení výsledků slouží program Post-CFD. Za pomoci tohoto programu byly vytvořeny všechny grafické výstupy pro teploty jednotlivých prvků, tlaky oleje, rychlosti a směry proudění chladicí kapaliny, součinitele přestupu tepla a další.

Dosažené výsledky ukazují, jak se simulované transformátory chovají v ustáleném stavu. Výsledky jsou docela věrohodné, rozhodně přesnější než analytické výpočty a představují chování transformátoru v reálné praxi. Avšak jedná se o první výpočty, navíc na značně zjednodušených modelech – v našem případě byla geometrie dosti zjednodušená. Lepších výsledků by se dosáhlo - přesnější geometrií, přidáním dalších prvků transformátoru jako jsou spojky, distanční vložky, šrouby apod. Jádru by muselo být složeno z normovaných elektrotechnických plechů a cívky tvořeny jednotlivými závitami, kdežto v našem případě tvoří cívky válcové plochy. V neposlední řadě by ke zpřesnění výsledků dopomohl i přesnější popis materiálových vlastností.

I přes všechna tato zjednodušení bylo dosaženo kvalitních výsledků. Většina z nich odpovídá teoretickým předpokladům a ukazují také, že analytické výpočty nemusí být zdaleka tak přesné, jak by se očekávalo. Všechny tyto dosažené hodnoty jsou podtrženy grafickými výstupy v podobě obrázků a grafů.

Kýženým výsledkem je ukázka vzniku tepla na jednotlivých prvcích transformátoru a znázornění proudění chladicí kapaliny (oleje) v celém objemu nádoby transformátoru a zejména v okolí jádra a cívek transformátoru. Transformátor s přirozeným chlazením se zahřívá na mnohem větší teplotu než transformátor s nuceným chlazením. Proudící chladicí kapalina lépe odvádí vzniklé teplo a účinněji chladí celý transformátor.

Je potvrzeno, že moderní výpočetní programy mají v dnešní době své uplatnění. Jejich využívání je stále více populárnější, avšak obsluha těchto programů si žádá zkušené odborníky. Moderní výpočetní programy dokáží usnadnit práci inženýrům při návrzích nových strojů, zařízení či úpravě prvků a firmám ušetřit nemalé peníze při financování nových projektů.

9. Literatura

- [1] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory: Teoretické základy*. 3. opravené a doplněné vydání. Místo vydání: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, Praha, v roce 1973. Počet stran: 652. ISBN 509 – 21 - 875
- [2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1: Úvod – transformátory*. 3. opravené a doplněné vydání. Místo vydání: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, Praha, v roce 1980. Počet stran: 388. ISBN 509 – 21 - 857
- [3] Ing. ČERMÁK Tomáš, CSc., Prof. Ing. KEPPERT Svetozar, CSc. *Elektrické stroje I.: Transformátory*. 2. vydání. Místo vydání: Vysoká škola báňská TU-Ostrava, Ostrava, v roce 1984. Počet stran: 142.
- [4] Prof. Ing. Dr. CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání. Místo vydání: Státní nakladatelství technické literatury, n.p., Praha, v roce 1958. Počet stran: 716. ISBN L 25b – C3 – 4 – II -/5198
- [5] Ing. HAVELKA, Otto, CSc., a kolektiv. *Elektrické přístroje*. 1. vydání. Místo vydání: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., Praha, v roce 1985. Počet stran: 440. ISBN 04 – 529 - 85
- [6] BUL, B.K. a kolektiv. *Elektrické přístroje – Základy teorie*. 1. vydání. Místo vydání: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., Praha, v roce 1977. Počet stran: 544. ISBN L25 - B3 - V - 31F/52220
- [7] HAK, Josef, OŠLEJŠEK, Oldřich. *Výpočet chlazení elektrických strojů*. 1. díl: fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Místo vydání: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů, Brno, v roce 1973.
- [8] Prof. Ing. Dr. CIGÁNEK, Ladislav, Ing. Dr. BAUER, Miroslav. *Elektrické stroje a přístroje*. 2. vydání. Místo vydání: Státní nakladatelství technické literatury, n.p., Praha, v roce 1957. Počet stran: 640. ISBN L25 - C2 – 4 - II/5270
- [9] Ing. BLEJCHAŘ, Tomáš, PhD. *Návody do cvičení „Modelování proudění“ – CFX*. 1. vydání. Místo vydání: Vysoká škola báňská TU-Ostrava, Ostrava, v roce 2009. Počet stran 133. ISBN 978 - 80 - 248 - 2050 – 7. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/>
- [10] NEZHYBA, Ondřej. *Průzkum trhu – software pro technické kreslení*. Ostrava, 2008. 31 stran. Bakalářská práce na fakultě elektrotechniky a informatiky Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava na katedře elektrických strojů a přístrojů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kačor, Ph.D.
- [11] Internetové stránky katedry didaktiky fyzika Univerzity Karlovy - <http://fyzweb.cuni.cz/>
- [12] Internetové stránky firmy SVS FEM - <http://www.svsfem.cz/>
- [13] Internetové stránky firmy TechSoft Engineering, spol. s r.o. - <http://www.techsoft-eng.cz>
- [14] Internetové stránky Lesnické a dřevařské fakulty Mendlovy univerzity v Brně - <http://wood.mendelu.cz>
- [15] Internetové stránky <http://cs.wikipedia.org/wiki/Transformátor>. Obrázek stažen dne 9.11.2009 v 18:32 hod.

10. Přílohy

Příloha č.1 – Příklad návrhu transformátoru.

Příloha č.2 – Výkres transformátoru s přirozeným chlazením.

Příloha č.3 – Výkres transformátoru s nuceným chlazením.